



Mémoire de fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Agronome, spécialité
Sciences et Génie de l'environnement

Evaluation des stocks en carbone des sols agricoles réunionnais par spectroscopie moyen infrarouge (MIR), mesures in situ et construction de modèles de prédictions

Soutenu par Solène QUERO le 27 septembre 2017 devant :

- M. C. SCHWARTZ, Docteur en Sciences Agronomiques au sein du Laboratoire Sols et Environnement de l'ENSAIA de Nancy

Maîtres de stage :

- M. A. ALBRECHT, Directeur de Recherche à l'IRD au sein de l'UMR Eco&Sols
- M. P. TODOROFF Chercheur au CIRAD, responsable de l'équipe de recherche ARTISTS
- Mme M. ALLO, Doctorante au sein de l'équipe de recherche ARTISTS

Mars-Août 2017

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Alain ALBRECHT, chercheur pédologue très avisé et disponible, qui m'a guidée tout au long de ce stage et qui a su partager sa passion pour la pédologie. Je reviens en métropole avec des connaissances et une compréhension de la spectroscopie qui me seront bien utiles pour la suite de mon parcours professionnel.

Merci tout particulièrement à Pierre TODOROFF et à Myriam ALLO pour leur bonne humeur, leur soutien quotidien et leurs bons conseils. Leur aide au cours des sorties terrain nous aura été des plus précieuses.

Merci à Marion RAMOS, avec qui partager ces 6 mois de stage fut un réel plaisir et sans qui cette aventure n'aurait vraiment pas été la même. Merci de m'avoir épaulée quand mon moral était au plus bas. Les sorties terrain avec le pick-up, les macatias nutella, les fous rires, les moments de découragements et nos discussions, je ne suis pas prête de les oublier.

Merci à Lionel LE MEZZO, confrère breton, pour son aide sur le terrain, ses blagues et sa constante bonne humeur.

Merci également à toute l'équipe ARTISTS pour la qualité de son accueil et la joyeuse ambiance qui règne dans ses bureaux. Merci Louis, Raymond, Agnès, Stéphane et Pascal.

Merci à toutes les personnes rencontrées au cours de ce stage, en particulier les agriculteurs qui nous ont accordé leur confiance en nous laissant faire des prélèvements dans leurs champs.

Merci à tous les stagiaires, thésards et VSC qui ont fait de ce stage au CIRAD de La Réunion une aventure inoubliable. Mention spéciale pour Dylan, metteur en scène, caméraman, cascadeur et blagueur grâce à qui le film C@RUN sera une réussite, j'en suis certaine !

A mes colocataires de la case 19 : Marion, Natasha, Claire, Guillaume, Margaux, Blandine, Ismaël et Anne-Laure, un immense merci pour tous ces moments partagés et pour la joie que vous m'avez apportée.

Merci, enfin, à ma famille pour sa relecture attentive et son précieux soutien.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	1
Table des figures	4
Table des tableaux	5
Introduction	6
I. Etat de l'art	7
I.1 Contexte pédoclimatique	7
I.1.1 Le volcanisme : déterminant de la géologie et de la topographie	7
I.1.2 Un climat très contrasté	8
I.1.3 La pédologie, reflet du climat et de la géologie	9
I.1.4 Bilan : Climatoséquence des sols de la Réunion.....	12
I.2 Dynamique du stockage du carbone dans les sols	12
I.2.1 Le cycle du carbone	12
I.2.2 Le stockage du carbone dans les sols	13
I.2.3 Variations du stockage du carbone dans les sols agricoles tropicaux	13
I.2.3.1 Facteur abiotiques.....	13
I.2.3.2 Facteur anthropique.....	14
II. Matériels et Méthodes	15
II.1 La spectroscopie IR, une méthode innovante d'analyse des composés des sols.....	15
II.1.1 Découverte de la spectroscopie IR	15
II.1.2 Principe de la spectroscopie ir.....	15
II.1.3 La spectroscopie MIR, une nouvelle méthode plus précise que le PIR ?	16
II.2 Mise en place du protocole expérimental	17
II.2.1 Démarche de calcul des stocks de carbone.....	17
II.2.2 Choix des sites de prélèvements	17
II.2.3 Protocole	18
II.2.3.1 Détermination de la DA.....	18
II.2.3.1.1 Méthode conventionnelle, les cylindres	18
II.2.3.1.2 nouvelle methode, la carotte	18
II.2.3.2 Acquisition des spectres.....	19
II.2.3.3 Analyse chimique : teneur en carbone, azote et matière sèche	19
II.2.3.4 Bilan : trois protocoles en un, afin de tester l'efficacité de la méthode MIR in situ	19
II.2.4 Traitement des données spectrales	20
III. Analyse des résultats	21
III.1 Simplification du protocole : comparaison $DA_{cylindres}/DA_{carotte}$	21
III.2 Résultats préliminaires.....	22
III.2.1 Choix des groupes d'échantillons à traiter	22

III.2.2 Mise en évidence de l'importance des prétraitements pour l'analyse des spectres et la construction des modèles	23
III.2.3 Paramètres de fiabilité d'un modèle	24
III.3 Comparaison de la fiabilité des modèles MIR et PIR.....	25
III.3.1 La nouvelle methode MIR	25
III.3.1.1 Le laboratoire (spectres DRIFT)	25
III.3.1.2 Le terrain (spectres ATR)	25
iii.3.2 Le PIR	26
III.3.2.1 Le laboratoire	26
III.3.2.2 Le terrain	27
III.3.3 comparaison PIR/mir, LABO/TERRAIN.....	27
III.3.4 Comparaison des prédictions des stocks en carbone organique	28
IV. Précisions que les résultats Discussion	28
IV.1 Résultats préliminaires.....	28
IV.1.1 Le MIR	28
IV.1.2 Le PIR.....	29
IV.2 La Teneur en eau.....	29
IV.3 La densité apparente	29
IV.4 Prédiction de la Teneur en carbone organique.....	30
IV.5 La prédiction des stocks en carbone organique.....	30
IV.5.1 En PIR	30
IV.5.2 En MIR	31
IV.6 Est-il préférable de prédire les SCO ou de prédire les paramètres servant au calcul des SCO ?	32
Conclusion	33
Références	34
Annexes.....	37
Annexe 1 : Déroulement du protocole expérimental jour après jour.....	37
Annexe 2 : calcul de la DA et des SCO	38
Annexe 3 : ACP TERRAIN/LABO MIR et PIR	40

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : CARTE DE L'ILE DE LA REUNION - SOURCE FOND DE CARTE : GEOPORTAIL.....	8
FIGURE 2 : PROFIL TOPOGRAPHIQUE DE LA REUNION - SOURCE : GOOGLE EARTH.....	8
FIGURE 3 : CARTE GEOLOGIQUE DE LA REUNION - SOURCE DDR.....	9
FIGURE 4 : L'EFFET DES ALIZEES - SOURCE : NICOLAS PAYET.....	9
FIGURE 5 : CARTE SIMPLIFIEE DES SOLS DE LA REUNION - SOURCE : (RAUNET, 1991).....	10
FIGURE 6 : PODZOL - SOURCE : BOTURUS.....	11
FIGURE 7 : ANDOSOL - SOURCE : PEDOTHEQUE DE L'AFES.....	11
FIGURE 8 : SOL BRUN - SOURCE : PEDOTHEQUE DE L'AFES.....	12
FIGURE 9 : SOL FERRALITIQUE FAIBLEMENT LESSIVE - SOURCE : PEDOTHEQUE DE L'AFES.....	12
FIGURE 10 : CLIMATOSEQUENCE DE LA REUNION - SOURCE : (LEGROS J.P., 2007).....	13
FIGURE 11 : SITUATION DU DOMAINE DE L'INFRAROUGE DANS LE SPECTRE DU RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE – SOURCE : (TRUCHE C., 2010).....	16
FIGURE 12 : REPARTITION DES POINTS DE PRELEVEMENTS DE LA CAMPAGNE 2017 - SOURCE : PERSONNELLE, CARTE FAITE SOUR QGIS.....	18
FIGURE 13 : PROTOCOLE D'UTILISATION DES CYLINDRES - SOURCE : PERSONNELLE.....	19
FIGURE 14 : ACQUISITION DES SPECTRES MIR PAR TRANCHE DE 10 CM - SOURCE : PERSONNELLE.....	20
FIGURE 15 : PROTOCOLE DE VERIFICATION DE L'EFFICACITE DU PROTOCOLE MIR - SOURCE : PERSONNELLE.....	20
FIGURE 16 : SPECTRES MIR DRIFT BRUTS AVEC EFFETS ADDITIFS - SOURCE : OBTENU AVEC THE UNSCRAMBLER.....	21
FIGURE 17 : SPECTRES MIR ATR BRUTS AVEC EFFETS MULTIPLICATIFS- SOURCE : OBTENU AVEC THE UNSCRAMBLER.....	21
FIGURE 18 : SPECTRES PIR DRIFT BRUTS AVEC EFFETS ADDITIFS - SOURCE : OBTENU AVEC THE UNSCRAMBLER.....	21
FIGURE 19 : COMPARAISON DES MESURES DE DA 2017.....	22
FIGURE 20 : ACP MIR DRIFT LABO 2016/2017.....	23
FIGURE 21 : ACP PIR 2016/2017.....	23
FIGURE 22 : ACP PIR EN FONCTION DE L'OCCUPATION DU SOL.....	23
FIGURE 23 : ACP DRIFT LABO EN FONCTION DES TYPES DE SOLS.....	24
FIGURE 24 : ACP ATR TERRAIN EN FONCTION DES TYPES DE SOLS.....	24
FIGURE 25 : ACP MIR DRIFT LABO AVEC PRETRAITEMENTS.....	24
FIGURE 26 : ACP ATR TERRAIN AVEC LISSAGE+SNV.....	24
FIGURE 27 : ACP PIR LISSAGE+SNV, EN FONCTION DU TYPE DE SOL.....	25
FIGURE 28 : ACP PIR LISSAGE+SNV, EN FONCTION DE L'OCCUPATION DU SOL.....	25
FIGURE 29 : PLS DES SCO SUR SPECTRES MIR DRIFT BRUTS.....	26
FIGURE 30 : REGRESSION PLS DES SCO SUR SPECTRES MIR DRIFT AVEC LISSAGE, SNV, BASELINE ET 2EME DERIVEE.....	26
FIGURE 31 : REGRESSION PLS DES SCO SUR SPECTRES ATR BRUTS.....	27
FIGURE 32 : REGRESSION PLS DES SCO SUR SPECTRES ATR PRETRAITES (LISSAGE+SNV).....	27
FIGURE 33 : REGRESSION PLS DES SCO SUR SPECTRES PIR LABO BRUTS.....	27
FIGURE 34 : REGRESSION PLS DES SCO SUR SPECTRES PIR LABO AVEC LISSAGE + SNV.....	27
FIGURE 35 : REGRESSION PLS DES SCO SUR SPECTRES BRUTS.....	28
FIGURE 36 : REGRESSION PLS DES SCO SUR SPECTRES AVEC LISSAGE+SNV.....	28
FIGURE 37 : COMPARAISON DES TROIS PARAMETRES DE FIABILITE DU MODELE DE PREDICTION DES SCO EN FONCTION DES MEILLEURES METHODES MIR/PIR ET TERRAIN/LABO.....	29
FIGURE 38 : X-LOADINGS (PC 1) DE L'ACP DRIFT LABO.....	30

FIGURE 39 : X-LOADINGS (PC 1) DE L'ACP ATR TERRAIN.....	30
FIGURE 40 : X-LOADINGS PC1 DE L'ACP PIR AVEC PRETRAITEMENTS.....	30
FIGURE 41 : SCO PREDITS EN FONCTION DES SCO MESURES.....	33
FIGURE 42 : SCO CALCULES EN FONCTION DES SCO MESURES.....	33
FIGURE 43 : SCO PREDITS EN FONCTION DES SCO MESURES.....	33
FIGURE 44 : NOUVEAUX SCO CALCULES EN FONCTION DES SCO MESURES.....	33

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: PARAMETRES DE FIABILITE DES MODELES EN FONCTION DES PRETRAITEMENTS, O : OUTLIERS , C : TENEUR EN CARBONE, W : TENEUR EN EAU	25
TABLEAU 2 : PARAMETRES DE FIABILITE DES MODELES DE PREDICTION EN ATR, O : OUTLIERS	25
TABLEAU 3 : PARAMETRES DE FIABILITE DES MODELES DE PREDICTION EN PIR LABORATOIRE, O: OUTLIERS	26
TABLEAU 4 : PARAMETRES DE FIABILITE DES MODELES EN PIR TERRAIN, O : OUTLIERS	27
TABLEAU 5 : COMPARAISON DES MEILLEURS PREDICTIONS MIR/PIR ET LABO/TERRAIN, LES VALEURS CONSIDEREES COMME CORRECTES : $R^2 > 0.9$, $RMSE < 10$ ET UN $RDP > 2$, APPARAISSENT EN VERT DANS LE TABLEAU	27
TABLEAU 6 : RECAPITULATIF DES MEILLEURES METHODES DE PREDICTIONS SUIVANT CHACUNE DES VARIABLES	27

Stéphane LE FOLL, ex-ministre de l'Agriculture a déclaré en 2016 « Le "4 pour 1000", c'est l'idée que [...] les sols en agriculture peuvent stocker du carbone et donc résoudre une partie du problème du réchauffement climatique » (LE FOLL S., 2016). En effet chaque année, 4,3 milliards de tonnes de carbone sont rejetées dans l'atmosphère (4 pour 1000, 2017), favorisant ainsi l'effet de serre et le réchauffement climatique. Le concept du 4 pour 1000 serait de contrer cette augmentation, en stockant seulement 0,4% de carbone en plus dans les sols chaque année.

C'est dans le cadre de ce programme, lancé en 2015 lors de la COP21, que le projet C@RUN (Carbone Réunion) a vu le jour. En effet, très peu de références sur ce sujet existent sous les tropiques et en particulier à La Réunion qui présente pourtant une très forte diversité de sols (RAUNET, 1991). Mis en place par le CIRAD et l'IRD, C@RUN a pour objectif de créer une carte des stocks en carbone organique des sols agricoles de La Réunion, afin de mettre en évidence les « puits » de carbone, mais aussi les « sources ». Cette carte pourrait servir d'outil d'aide à la décision pour les agriculteurs, afin de tendre vers une agriculture qui séquestre plus de CO₂ qu'elle n'en émet.

Mon stage de fin d'études s'inscrit dans ce projet, en mettant en place un modèle de calcul des Stocks de Carbone Organique (SCO) à partir d'un spectre infrarouge, obtenu in situ. L'originalité de la démarche est d'utiliser non pas un spectre proche infrarouge (PIR), comme cela se fait depuis plusieurs années déjà (VISCARRA ROSSEL R.A., 2006 ; GENOT V., 2014 ; CAMBOU A., 2015), mais un spectre moyen infrarouge (MIR). Alors que le PIR émet dans des fréquences dites harmoniques, le MIR émet dans les fréquences fondamentales et donne donc des informations plus précises, notamment sur la minéralogie des sols. Les hypothèses de travail seraient alors qu'il est possible de prédire les Stocks en Carbone Organique (SCO) des sols grâce à un spectre MIR. Ensuite, que la prédiction est meilleure en MIR qu'en PIR et enfin, qu'il est possible de prédire les SCO directement sur le terrain. Faire les mesures in situ permettrait de se dispenser, dans une certaine mesure, des analyses conventionnelles de laboratoire et donc de gagner du temps et de l'argent.

I. ETAT DE L'ART

Apparue il y a environ 3 millions d'années dans l'Océan Indien, à 800 kilomètres à l'est de Madagascar, l'île de La Réunion fait partie de l'archipel des Mascareignes. Ce dernier comprend également l'île Maurice, Rodrigue et les îlots Agalega et Cargados.

I.1 CONTEXTE PEDOCLIMATIQUE

I.1.1 LE VOLCANISME : DETERMINANT DE LA GEOLOGIE ET DE LA TOPOGRAPHIE

La Réunion, comme tout l'archipel, doit sa formation à la présence d'un point chaud qui, dans un premier temps, a créé le Piton des Neiges et dans un second, le Piton de la Fournaise. De ces deux volcans, seule la Fournaise est toujours en activité, le Piton des Neiges s'étant éteint il y a 12 000 ans (RAUNET, 1991). L'affaissement du Piton des Neiges, ainsi que l'érosion, ont entraîné la formation de trois cirques : Cilaos, Salazie et Mafate, aux versants abrupts et encaissés (Fig.1 et 2).



Figure 1 : Carte de l'île de La Réunion - Source fond de carte : Géoportail



Figure 2 : Profil topographique de La Réunion - Source : Google Earth

Cette activité volcanique intense a eu et a toujours pour conséquence la création d'une très grande diversité de laves, aussi bien en ce qui concerne leur chimie, que leurs types d'émission ou leur chronologie. Ainsi, le sous-sol réunionnais présente aussi bien des roches alcalines (océanites) que des roches acides telles les trachytes (Fig.3). De plus, bien que le volcanisme soit à dominante effusive, il arrive que des épisodes explosifs se produisent.

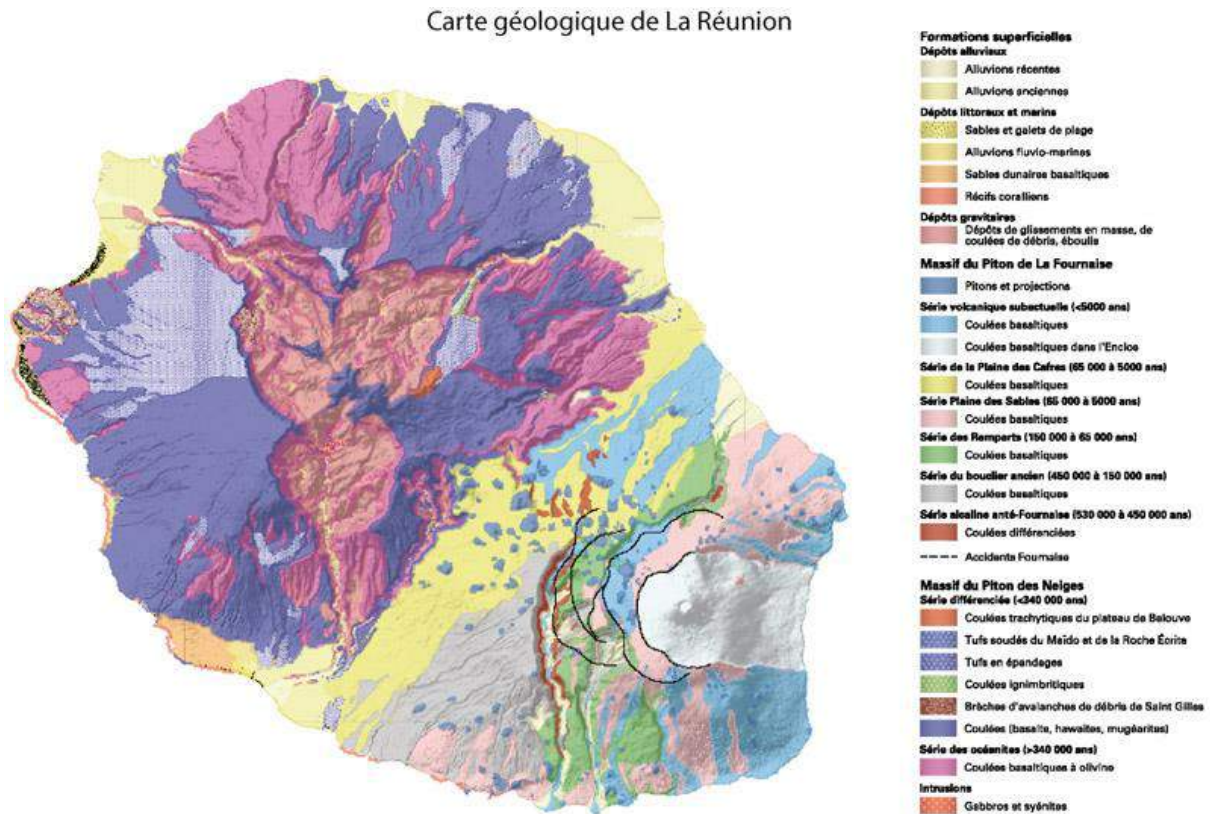


Figure 3 : Carte géologique de la Réunion - Source DDR

I.1.2 UN CLIMAT TRES CONTRASTE

De par sa situation géographique, entre l'équateur et le tropique du Capricorne, son caractère insulaire et son relief très marqué, La Réunion présente un climat tropical fortement contrasté.

Le facteur principal du climat est le régime des masses d'air, avec les Alizés ainsi que les perturbations tropicales telles que les cyclones.

Les Alizés coupent l'île en deux, créant une zone dite « au vent » et une autre dite « sous le vent » (Fig.4). Ces vents, chargés d'humidité, arrivent au niveau de La Réunion suivant une orientation Est/Sud-Est et Ouest/Nord-Ouest. Les masses d'air se retrouvent confrontées au relief et subissent une ascension accompagnée d'une détente et d'une condensation, entraînant des pluies orographiques sur la façade « au vent ». En redescendant de l'autre côté, cet air se comprime et se désature, assurant un temps sec et ensoleillé. C'est ce qu'on appelle l'effet de Foehn.



Figure 4 : L'effet des Alizées - Source : Nicolas Payet

I.1.3 LA PEDOLOGIE, REFLET DU CLIMAT ET DE LA GEOLOGIE

La pédogenèse, c'est-à-dire la formation d'un sol, dépend du climat, de la roche-mère et de la végétation. A La Réunion, un lit de pyroclastites cendro-tuffeuses recouvre la majeure partie du Piton des Neiges et de celui de la Fournaise, la roche-mère est donc la même pour une grande partie de l'île. L'altitude et la température expliquent alors la zonation, donc le degré d'altération. Cependant, une grande partie de l'île est dépourvue de sol, notamment en raison de la présence de coulées volcaniques très jeunes et de reliefs escarpés (RAUNET, 1991).

D'après la carte simplifiée des sols de RAUNET (Fig.5), La Réunion se compose de 6 grands types de sols répartis de manière concentrique autour des deux pitons, du moins altéré au plus altéré. Les sols bruns de 0 à 350 mètres, les sols bruns andiques de 350 à 600 mètres, les andosols non perhydratés de 600 à 1 300 mètres, les andosols perhydratés de 1 300 à 1 600 mètres, les sols ferralitiques de 0 à 350 mètres dans les zones littorales sèches de l'ouest et les sols ferralitiques entre 0 et 600m d'altitude, sur les planèzes du Nord-Est (MVAD, 2003) et (RAUNET, 1991) .

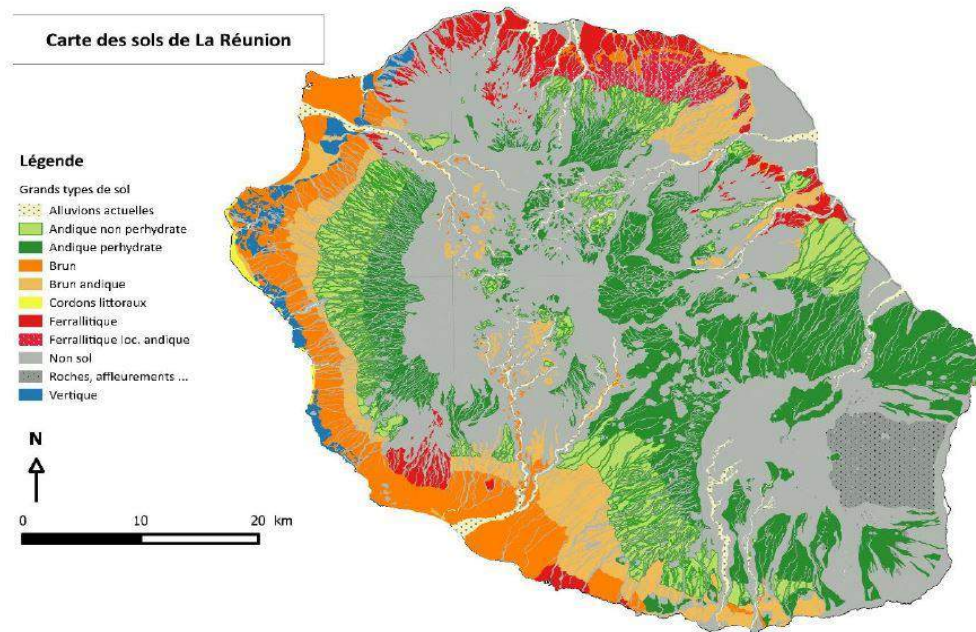


Figure 5 : Carte simplifiée des sols de La Réunion - Source : (RAUNET, 1991), carte faite sous QGIS

- *Sol podzolique*

Les podzols, venant du russe « pod » (en dessous) et « zola » (cendre), possèdent en effet un horizon E juste sous la surface similaire à de la cendre, blanchâtre et appauvri (Fig.6). Ce sont des sols très évolués, à profil ABC dont l'évolution est conditionnée par la présence d'un humus (mor) très acide, à décomposition lente (MATHIEU C., 2011). Sous l'horizon E se trouve un horizon B d'accumulation, avec de la matière organique, des sesquioxides de fer et d'aluminium et une grande quantité de phytolithes. Les phytolithes sont des dépôts d'opale qui occupent les parois cellulaires, les vides intracellulaires et les espaces intercellulaires des plantes et qui, dans les conditions de La Réunion, s'accumulent dans le sol suite à la mort de la plante (LEGROS J.P., 2007).

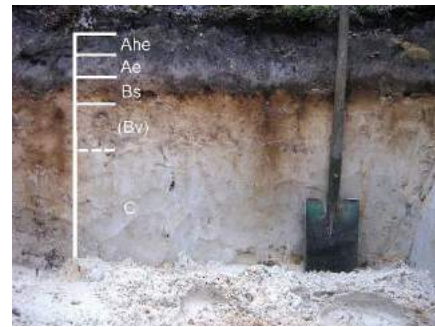


Figure 6 : Podzol - Source : Boturus

- *Sol andique*

Le terme « andique » vient du mot japonais « an » (noir) et « do » (le sol). Les andosols sont donc des « sols noirs » (cf Fig.7), révélant ainsi leur origine volcanique. Mais surtout, le terme andique implique la présence des colloïdes minéraux secondaires peu ou mal cristallisés autrement dit, des allophanes : $Al_2O_3 \cdot (SiO_2)_{1.3-2} \cdot (H_2O)_{2.5-3}$. C'est la présence de verre dans la roche volcanique, hautement réactif dans les conditions de surface, ainsi qu'un climat froid et humide typique des Hauts de l'île qui permet leur formation (MATHIEU C., 2011).

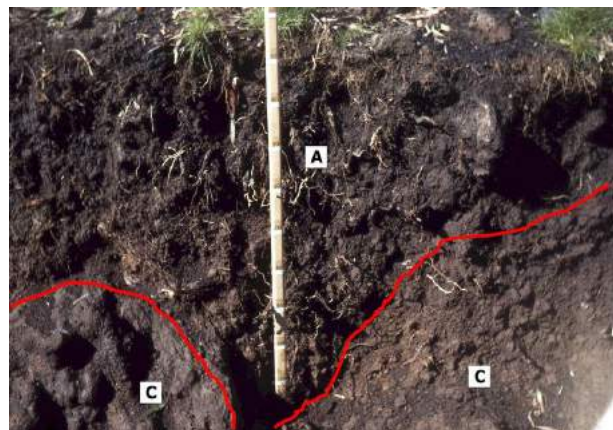


Figure 7 : Andosol - Source : Pédothèque de l'AFES

Les allophanes sont de faible taille (5-500 Å) mais sont d'une réactivité considérable : leur surface d'échange peut s'étendre jusqu'à 1000 m²/g (contre 10 à 100m² pour une argile) et ils présentent des bouts de chaînes favorisant la capture ou l'échange d'ions. De plus, de par leur structure paracrystalline, les liaisons entre atomes sont très instables. Les allophanes peuvent également se combiner à la Matière Organique et former des complexes, bloquant l'argilisation, stabilisant fortement la MO et permettant son accumulation. En effet, la teneur en carbone de ces sols dépasse souvent les 25kg.m⁻² (LEGROS J.P., 2007).

La présence de ces minéraux confère aux andosols une grande capacité de rétention de l'eau et un caractère thixotropique. L'application d'une force, par exemple la pression d'un doigt, sur ce sol est susceptible de le faire passer brutalement de l'état pâteux à l'état liquide (LEGROS J.P., 2007).

- *Sol brun andique*

Il s'agit d'un ancien sol andique situé en zone plus sèche, évoluant lentement vers le sol brun. Dans ces conditions, les allophanes se transforment en halloysite (argile) (LEGROS J.P., 2007).

- *Sol brun*

Ce sont des sols brunifiés, c'est-à-dire qu'ils possèdent un horizon B d'altération, coloré en brun par les oxydes de fer liés à l'argile (Fig.8) (MATHIEU C., 2011). Le fer est extrait des réseaux cristallins sous forme de Fe^{2+} et s'oxyde en Fe^{3+} au contact de l'air (LEGROS J.P., 2007).

L'association entre le fer, l'argile et la matière organique forme le complexe argile-humus-fer, qui confère au sol une structure fragmentaire nette et stable.

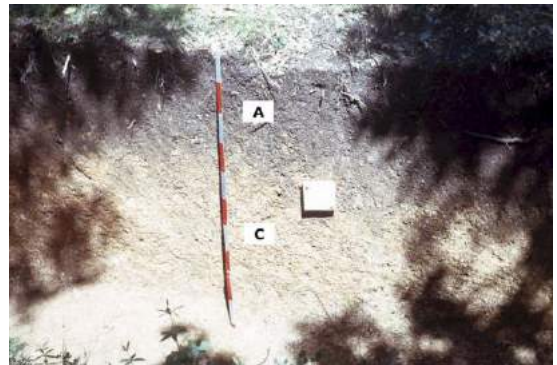


Figure 8 : Sol brun - Source : Pédothèque de l'AFES

- *Sol vertique*

Le terme vertique vient du latin « vertigo », signifiant « mouvement tournant ». En effet, ces sols bougent suivant des mouvements de convection très lents.

Les argiles se retournent principalement dans les horizons profonds, la silice des matériaux primaires étant remplacée par du fer en position octaédrique. Ils contiennent également de grandes quantités de kaolinite et de smectites, des argiles gonflantes, c'est pourquoi ces sols présentent de fortes fentes de retrait en cas de sécheresse.

Ce sont justement les variations de teneur en eau qui sont à l'origine des « mouvements tournants ». Ces sols subissent des phases de gonflement (swelling) et de retrait (shrinking), selon le type d'argile présent et sa teneur, qui provoquent des mouvements verticaux faisant chuter la matière organique dans les fentes de retrait. Cela entraîne une incorporation de la matière organique dans tout le profil (LEGROS J.P., 2007).

- *Sol ferralitique*

Les sols ferralitiques sont les sols les plus anciens de l'île. Ils se trouvent à basse altitude, sur des plateaux exposés aux vents. Pour se former, ils ont besoin d'une forte pluviosité et de hautes températures, ce qui provoque l'hydrolyse de matériaux primaires (feldspaths, micas, amphiboles etc...) et la formation de gibbsite (MATHIEU C., 2011)

Sols très profonds, ils présentent un horizon ferralitique rougeâtre (Fig.9), riche en hydroxyde d'alumine, en hydroxydes de fer et en argile 1/1, plus de 60% généralement (LEGROS J.P., 2007).

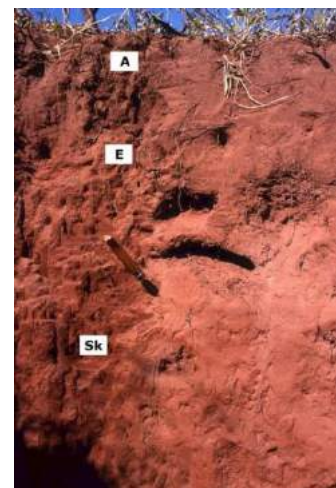


Figure 9 : Sol ferralitique faiblement lessivé - Source : Pédothèque de l'AFES

I.1.4 BILAN : CLIMATOSEQUENCE DES SOLS DE LA REUNION

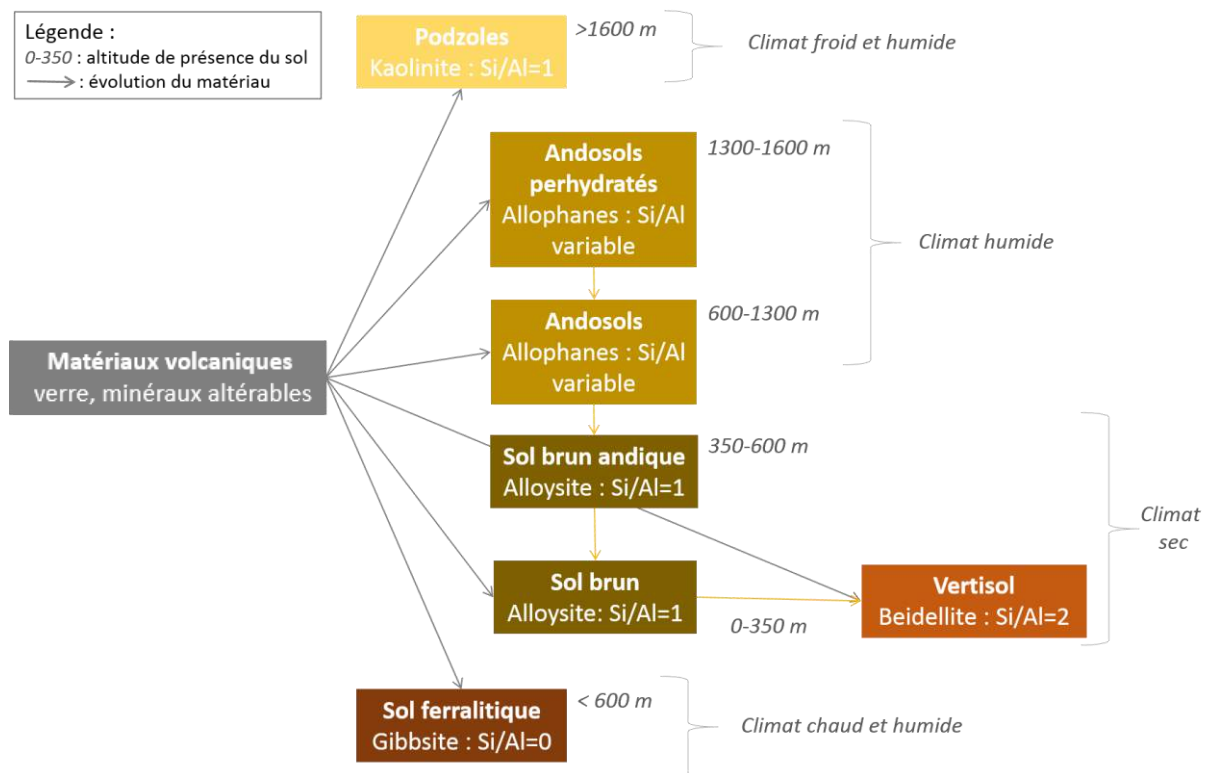


Figure 10 : Climatoséquence de La Réunion - Source : (LEGROS J.P., 2007)

I.2 DYNAMIQUE DU STOCKAGE DU CARBONE DANS LES SOLS

I.2.1 LE CYCLE DU CARBONE

Le carbone sur terre se répartit en quatre grands réservoirs : la lithosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère (CNRS, 2016) (JACQUES G., 2008). La lithosphère représente le plus gros réservoir de carbone de la planète avec 80 millions de gigatonnes (Gt) de carbone, dans les roches calcaires principalement, sous forme de CaCO_3 .

Vient ensuite l'hydrosphère, avec 39 000 Gt de carbone sous forme de HCO_3^- et CO_3^{2-} (JACQUES G., 2008). Puis l'atmosphère, avec 770 Gt de CO_2 , ce qui ne représente que 0,035% de la masse totale de l'atmosphère. Enfin arrive la biosphère, dont les composants principaux sont les protides, les lipides et les glucides, tous formés en majorité de carbone. Ce réservoir est estimé à 600 Gt. Les sols ainsi que les détritiques issus de l'activité des êtres vivants représentent quant à eux 2 600 Gt de carbone (CNRS, 2016).

Il existe des flux de carbone entre ces différents réservoirs : des flux biologiques, tels la transformation du carbone minéral en carbone organique par les plantes, et des flux physico-chimiques, tels la dissolution du CO_2 de l'atmosphère dans l'océan qui réagit avec le calcium pour former du CaCO_3 . Ce dernier précipite et se dépose au fond des océans.

Depuis le début de l'ère industrielle, la quantité de carbone atmosphérique ne cesse d'augmenter. Elle est passée de 280 ppmv en 1750 à 381 ppmv en 2006 et cette tendance s'accélère, entraînant un réchauffement climatique mondial (JUSSIEU, s.d.).

Si la quantité de carbone augmente actuellement dans l'atmosphère, c'est principalement pour deux raisons. Premièrement, la quantité de carbone dans les autres réservoirs diminue : les composés fossiles libèrent du carbone par leur combustion, le compartiment biotique à travers la déforestation et les feux de forêt, le sol sous l'effet de la mise en culture et d'autres activités anthropiques. Deuxièmement, il y a une réduction de l'efficacité des puits naturels du carbone. En effet, entre 2000 et 2006, 45% du CO₂ émis par l'homme restait dans l'atmosphère, 30% était absorbé par la végétation terrestre et 24% par les océans. Cependant, ces capacités d'absorption diminuent : en 2000, pour une tonne de CO₂ émise, 600 kg étaient absorbés ; en 2006, pour une tonne de CO₂ émise, seulement 550 kg sont absorbés. Et cette quantité semble encore diminuer (JUSSIÉ, s.d.).

Il est donc plus que nécessaire de comprendre comment fonctionnent ces puits, afin de pouvoir les utiliser au mieux et contrer les effets du réchauffement climatique.

Mieux contrôler les puits de carbone que sont les sols est notamment l'objectif de l'initiative « 4pour1000 », lancée en 2014 par la COP21. Il suffirait de séquestrer 0,4% de carbone par an dans les sols pour contrer l'effet de serre et le réchauffement climatique (Ministère de l'Agriculture, 2014).

I.2.2 LE STOCKAGE DU CARBONE DANS LES SOLS

Le sol est un réservoir de carbone inorganique de 700 à 750 Gt de CO₃²⁻ provenant principalement des carbonates lithogéniques (SPARKS, 2003). A cela s'ajoute le carbone organique de l'ordre de 2 400 Gt, sur 2m de profondeur. C'est 3 fois la réserve de carbone atmosphérique et plus de 4 fois la réserve biotique. Le sol est donc le plus gros réservoir de carbone organique sur terre (BANWART, Noellemeyer, & Milne, 2015).

Les animaux et les végétaux sont les vecteurs qui permettent le transfert du carbone atmosphérique vers le sol. Mais c'est par la photosynthèse que le carbone entre dans les écosystèmes (JACQUES G., 2008).

Cette photosynthèse permet à la plante de créer de la matière organique à partir du CO₂ atmosphérique. Lorsque les animaux et les végétaux meurent, cette biomasse fournit de la matière organique au sol. Sous l'action des décomposeurs, le carbone organique se minéralise et retourne dans l'atmosphère sous forme de CO₂ et de CH₄.

Ainsi, le stockage du carbone dans un sol dépend des entrées (les pertes par mortalité et les déjections animales) et des sorties (respiration des micro-organismes, perte de carbone organique dissout dans l'eau de drainage, perte de carbone particulaire et production de CH₄). Si les entrées sont supérieures aux sorties, alors le sol joue le rôle de puits en stockant du carbone. Dans le cas contraire il s'agit d'une source, c'est-à-dire que le sol émet du carbone.

I.2.3 VARIATIONS DU STOCKAGE DU CARBONE DANS LES SOLS AGRICOLES TROPICAUX

Cet équilibre puits/source est sensible aux perturbations, qu'elles soient ou non dues à l'homme.

I.2.3.1 FACTEUR ABIOTIQUES

- Le climat

L'activité biologique des décomposeurs est contrôlée par la température, ce qui fait de ce paramètre un potentiel facteur de variation des SCO. Ainsi, le réchauffement climatique entraînerait une augmentation du flux de carbone du sol vers l'atmosphère en augmentant le taux de minéralisation

(SMITH P., 2010) (CORBEELS M., 2016). Cependant, la minéralisation dépendrait davantage de l'humidité, qui peut être corrélée positivement avec les émissions de CO₂.

- La pédologie

C'est le type de sol qui conditionne le plus (à 34% environ) le stockage du carbone organique (GOGE F., 2014). Le potentiel de stockage est plus important dans les sols argileux, où la teneur en éléments fins est plus élevée (VENKATPEN C., 2012). Cela implique qu'il existe un seuil de stockage propre à chaque sol et que les sols déjà saturés ne pourront plus servir de puits (CORBEELS M., 2016).

I.2.3.2 FACTEUR ANTHROPIQUE

- Le travail du sol

Le labour est une technique de travail des sols agricoles, qui consiste à retourner la terre entre 0 et 30 cm de profondeur afin de mélanger les résidus de culture, les engrais et d'y introduire de l'oxygène. Cela provoque une cassure des agrégats, exposant la matière organique à l'air libre et favorisant sa minéralisation par oxydation. Le labour fait donc basculer le sol de « puits de carbone » en « source de carbone ».

De même, un sol agricole à nu expose l'horizon de surface, le plus riche en MO, au vent et à la pluie. Cette érosion provoque une perte de carbone organique (VENKATPEN C., 2012).

Plus généralement, toutes les techniques entraînant une diminution de la stabilité structurale pourraient impacter négativement les stocks de carbone organique (VENKATPEN C., 2012).

- Apports de biomasse

Les apports de biomasses, c'est-à-dire de matière organique d'origine végétale ou animale, augmentent significativement le SOC (JARECKI M.K., 2003 ; RAZAFIMBELO-ANDRIAMIFIDY T., 2010). C'est le cas avec la restitution des pailles au sol. Par exemple, les résidus de cannes à sucre représentent après la coupe 7 à 18 tonnes par hectares de biomasse et contiennent 42 % de carbone (POUZET D., 2011). Cela permettrait la formation de 30% d'agrégats supérieurs à 250 µm, donc des agrégats stables et de grande taille (BLAIR N., 2000).

L'apport d'amendement, tel que le compost ou le fumier, favorise également la stabilisation structurale du sol en le rendant plus léger ou plus lourd. Les engrais, quant à eux, jouent plutôt sur la production de biomasse, en apportant des éléments nutritifs (N, P et K) qui dynamisent l'activité microbienne (JARECKI M.K., 2003).

- Rotation des cultures

La rotation des cultures affecte le stockage du carbone, car les espèces qui se succèdent n'apportent pas la même quantité de biomasse au sol. De plus, elles possèdent une activité racinaire propre (pénétration, exsudats, encrage), qui modifie la structure physique des sols (JARECKI M.K., 2003) et donc la stabilité des agrégats.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1 LA SPECTROSCOPIE IR, UNE METHODE INNOVANTE D'ANALYSE DES COMPOSES DES SOLS

II.1.1 DECOUVERTE DE LA SPECTROSCOPIE IR

La découverte du rayonnement infrarouge (IR) date du XIX^{ème} siècle grâce à l'astronome William HERSCHEL, qui étudiait le rayonnement solaire. En plaçant un thermomètre sous un prisme soumis à la lumière du soleil, il s'est aperçu que la température de l'appareil continuait d'augmenter, même après avoir dépassé la couleur rouge (Le télescope spatial HERSCHEL, s.d.).

L'utilisation de la spectroscopie IR est arrivée un siècle plus tard, au XX^{ème} siècle, avec l'enregistrement de spectres de plus d'une centaine de composés par COBLENTZ, physicien américain. Ce dernier découvre que les enregistrements possèdent une signature spectrale propre à chacun, même si les composés disposent des mêmes éléments. Il en déduit qu'il est alors possible de différencier des substances uniquement grâce à leur spectre (THE COBLENTZ SOCIETY, s.d.).

La spectroscopie IR prend son essor dans les années soixante, quand BOWER et HANKS découvrent l'utilité de l'IR pour caractériser l'humidité, la Matière Organique et la texture des sols.

II.1.2 PRINCIPE DE LA SPECTROSCOPIE IR

Le rayonnement infrarouge émet une onde électromagnétique, c'est-à-dire une onde qui comporte à la fois un champ électrique et un champ magnétique, oscillant à la même fréquence (UVED, s.d.). Elle se caractérise par sa périodicité spatiale (longueur d'onde en μm ou nm) et sa périodicité temporelle (fréquence en cm^{-1}). La gamme de l'infrarouge comprend le proche, le moyen et le lointain infrarouge. Les domaines qui nous intéressent ici, le proche et le moyen infrarouge, s'étendent respectivement de 12 800 à 4 000 cm^{-1} et de 4 000 à 400 cm^{-1} (KING P.L., 2004) (cf Fig.11).

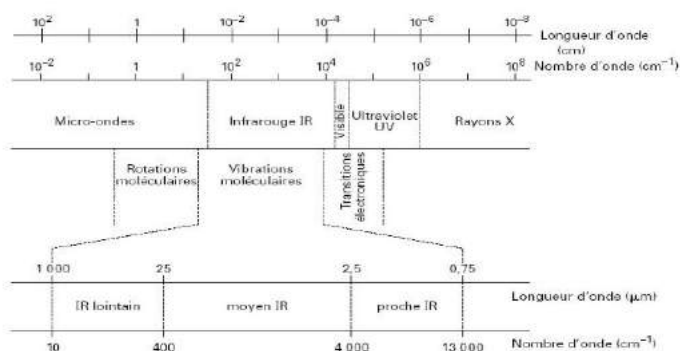


Figure 11 : Situation du domaine de l'infrarouge dans le spectre du rayonnement électromagnétique – Source : (TRUCHE C., 2010)

Le principe de la spectrométrie IR repose sur la mesure de l'interaction entre le rayonnement électromagnétique et la matière à différentes fréquences. Soumises à ce rayonnement, les molécules du composé testé vont réagir en fonction de la longueur d'onde. Dans l'infrarouge, elles vibrent en absorbant une partie du rayonnement incident, ou plus précisément, ce sont les liaisons entre molécules qui vibrent de façon spécifique. Il est alors possible de relier une longueur d'onde à une liaison. Par exemple, 1 900 nm correspond à la liaison H-OH de l'eau.

L'étude des spectres fournit deux types d'informations (TRUCHE C., 2010):

- des informations qualitatives, car grâce à la signature spectrale, il est possible de différencier les minéraux et la matière organique d'un matériau.
- des informations quantitatives, car l'intensité de la bande d'absorption rend compte de la concentration du groupe chimique caractéristique de cette absorption.

Utiliser la spectroscopie pour l'étude des sols présente de nombreux avantages : c'est une technique simple, non destructive, nettement reproductible, rapide, moins coûteuse que des analyses chimiques, permettant l'étude de plusieurs propriétés du sol en même temps et demandant un minimum de préparation (RAZAFIMBELO-ANDRIAMIFIDY T., 2010 ; RUMPEL C., 2001 ; SILA A.M., 2016 ; VISCARRA ROSSEL R.A., 2006).

La technique la plus couramment utilisée pour acquérir des spectres dans le MIR et le PIR est la Spectrométrie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR), car elle permet de collecter des informations sur une large gamme de longueurs d'ondes (SILA A.M., 2016). Deux méthodes d'acquisition en découlent : l'ATR, ou Réflectance Totale Atténuée et le DRIFT, Réflectance Diffuse. Le premier peut s'utiliser aussi bien pour les liquides que pour les solides, à condition que l'échantillon épouse bien la forme du capteur ; le deuxième est très perturbé par les vibrations des liaisons OH en début de spectre et s'utilise sur des poudres.

En PIR, c'est préférentiellement le DRIFT qui s'emploie alors qu'en MIR, l'une ou l'autre des méthodes peut convenir (ROBERTSON A.H.J., 2013) en fonction de l'état du sol. C'est pourquoi les deux méthodes ont été testées en MIR.

II.1.3 LA SPECTROSCOPIE MIR, UNE NOUVELLE METHODE PLUS PRECISE QUE LE PIR ?

En PIR, les groupements chimiques présentant une absorption sont principalement de la forme X-H, où X correspond aux atomes de carbone, d'oxygène, de soufre ou d'azote, et H à l'atome d'hydrogène. La SPIR est donc très favorable à l'étude des molécules organiques, dont les groupements C-H, O-H et N-H sont majoritaires (REEVES J.B., 2010). Cependant, l'absorption est modérée et les pics sont plus difficiles à lire que dans le MIR.

Le MIR quant à lui, émet des ondes que l'on appelle fondamentales, par rapport aux ondes émises en PIR, qui sont dites harmoniques. Les harmoniques sont des multiples des fondamentales, et à ce titre, apportent moins d'énergie. Ainsi, en MIR, l'absorption est intense et les bandes obtenues sont nettes et assignables à des groupes chimiques (BARTHES B.G., s.d. ; VISCARRA ROSSEL R.A., 2006). Les pics seront principalement dus aux vibrations des liaisons CC, CN, CO.

Les spectres MIR contiennent des informations à la fois sur la matière organique et sur les minéraux, tandis que les spectres PIR apportent des informations provenant principalement des composés organiques et des argiles (REEVES J.B., 2010). Ainsi, développer une méthode d'analyse en MIR pourrait donner des résultats plus précis qu'en PIR (MCDOWELL M.L., 2012).

II.2 MISE EN PLACE DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Trois objectifs devaient être poursuivis en parallèle :

- Mettre au point la méthode d'obtention des SCO à partir des mesures en moyen infrarouge.
- Valider ou non cette méthode en comparant ses résultats avec les mesures de laboratoire qui constituent la référence.
- Comparer les résultats des méthodes MIR et PIR et déterminer la meilleure.

II.2.1 DEMARCHE DE CALCUL DES STOCKS DE CARBONE

Un Stock de Carbone Organique (t/ha) se calcule comme suit :

$$\text{SCO} = C * DA * e * (1 - EG)$$

C : teneur en carbone (g.kg)

DA : densité apparente (g.cm⁻³)

e : épaisseur de l'horizon (cm)

EG : éléments grossiers

L'épaisseur et les éléments grossiers peuvent se mesurer directement sur une carotte de sol, dont le spectre MIR ou PIR, sert ensuite à calculer une teneur en carbone. En ce qui concerne la DA, c'est un paramètre physique et non chimique ou minéralogique et il est normalement impossible de la prédire à partir d'un spectre :

$$DA = P/V$$

P : poids sec de l'échantillon (g)

V : volume de l'échantillon (m³)

Cette difficulté peut être contournée à La Réunion, milieu tropical volcanique, où la pédogénèse entraîne la formation d'allophanes (cf §2) qui influencent très fortement la DA : plus il y a d'allophanes et plus la DA est faible. Les spectres PIR et MIR sont à ce titre très intéressants puisqu'ils donnent aussi des informations sur la teneur du sol en allophanes. L'idée est donc de les utiliser pour prédire la DA en créant un modèle.

II.2.2 CHOIX DES SITES DE PRELEVEMENTS

Il a été montré plus haut que les types de sols étaient le déterminant le plus important de la variabilité du stockage en carbone. C'est pourquoi les sites de prélèvements sélectionnés (Fig.12) pour mettre au point la méthode ont été choisis pour leur représentativité des 5 types de sols majoritaires de La Réunion, soit les sols bruns (site 30/33), bruns andiques (22/29/34), ferrallitiques (26), andiques perhydratés (25/27/31), et non perhydratés (23/24/28/32) (cf Fig.12).

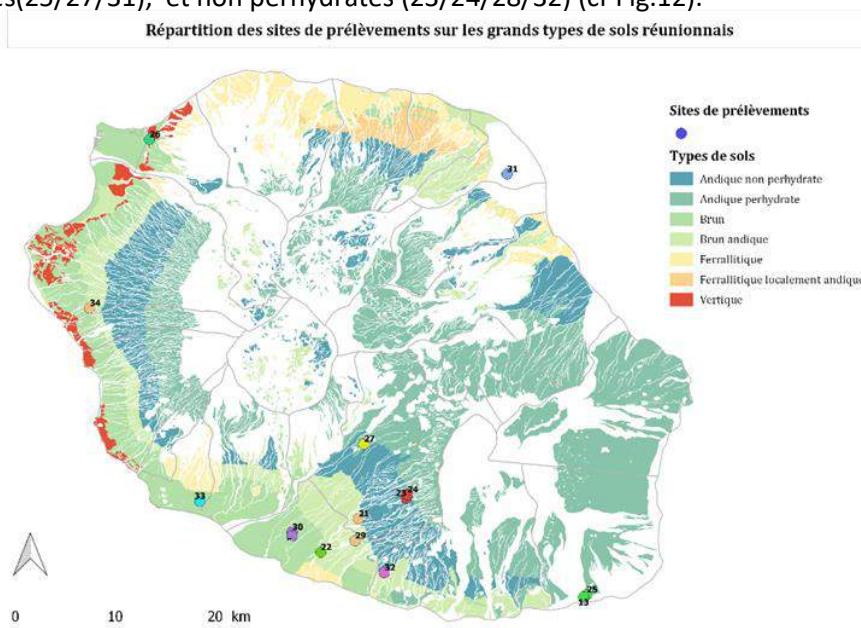


Figure 12 : Répartition des points de prélèvements de la campagne 2017 - Source : personnelle, carte faite sous QGIS

II.2.3 PROTOCOLE

Le déroulement jour par jour du protocole se trouve annexe 1.

II.2.3.1 DETERMINATION DE LA DA

II.2.3.1.1 METHODE CONVENTIONNELLE, LES CYLINDRES

- Le terrain

Une fois sur le terrain, les 3 sites de prélèvements ont été sélectionnés afin d'être les plus représentatifs possible de la parcelle. Par exemple, si cette dernière présentait une pente, un site était choisi en bas de pente, l'autre au milieu et le dernier en haut. 9 cylindres de 10 cm de hauteur et de diamètre équivalent ont été enfoncés au marteau dans le sol, par tranche de 3 cylindres sur trois profondeurs : 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm (Fig.13). En connaissant le volume de terre prélevée et son poids, cette méthode permet de calculer la Densité Apparente d'un sol.

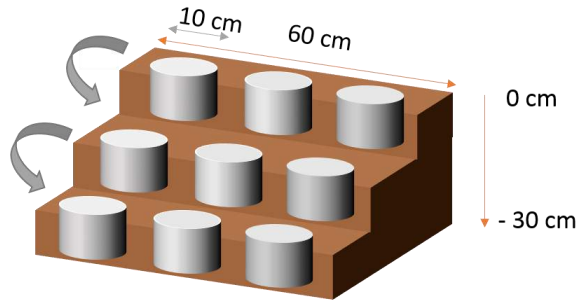


Figure 13 : Protocole d'utilisation des cylindres - Source : Personnelle

- Le laboratoire

Au laboratoire, une aliquote a été prélevée pour chaque échantillon et placée pendant 48h à l'étuve, à 105°C. Prendre une aliquote au lieu de l'échantillon entier a permis de raccourcir le temps passé en traitement des échantillons, sachant que l'aliquote a les mêmes propriétés que l'échantillon entier (STERNE M., 2016). Deux jours après, les aliquotes ont été pesées afin d'obtenir le poids sec et le taux d'humidité, qui servent au calcul des SCO (Annexe 2).

II.2.3.1.2 NOUVELLE METHODE, LA CAROTTE

- Le terrain

Les trois sites de carottage étaient les mêmes que pour les cylindres, afin de pouvoir comparer les résultats. Une fois le sol dégagé, une gouge de 50 cm de long et 8,5 cm de diamètre, associée à un carotteur, a été enfoncée presque entièrement afin de ne pas tasser le sol. La gouge a été ensuite extraite grâce à un bras de levier et la fenêtre permettant d'accéder à la carotte retirée. La carotte en elle-même a été ensuite délimitée en tranche de 10cm à 40 cm. Chaque tranche a été extraite au couteau et pesée afin d'en déterminer la DA puis mise en sachet en vue d'analyses chimiques.

Cette méthode a permis de se dispenser de l'étape la plus chronophage de la partie terrain, la détermination de la DA par les cylindres.

- Le laboratoire

Le même protocole que pour les cylindres a été appliqué. C'est également lors de cette étape que nous avons évalué le taux d'éléments grossiers.

II.2.3.2 ACQUISITION DES SPECTRES

- Le terrain

Sur chaque tranche de 10 cm de carotte, 5 spectres MIR (Fig. 14) et 5 spectres PIR ont été réalisés, la carotte ayant été préalablement arasée pour le PIR, afin d'avoir une surface plane et une meilleure acquisition. Cela constituait la banque de spectres Terrain, réalisée in situ. Concernant le MIR, la méthode choisie fut l'ATR, le DRIFT ne donnant quasiment jamais de spectres exploitables.



Figure 14 : Acquisition des spectres MIR par tranche de 10 cm - Source : Personnelle

- Le laboratoire

Une fois les aliquotes prélevées sur la carotte, le reste de l'échantillon a été mis à l'étuve pendant 24h à 40 °C, afin de faciliter le tamisage et la récupération de la terre fine. C'est au cours de cette étape que les éléments grossiers ont été déterminés. 5 spectres NIR sur la terre fine ont été réalisés, cet état donnant les meilleurs spectres (STERNE M., 2016).

La terre finie a ensuite été mise en pot : un pot pour la pédothèque et un autre pour les analyses conventionnelles de laboratoire. Dans celui destiné aux analyses, une petite fraction a été broyée à 200µm d'après le protocole conventionnel de mesure en MIR. Cela a constitué la base de données LABO, en DRIFT, l'ATR ne fonctionnant pas du tout sur les échantillons secs. Un protocole de mesure en ATR en labo n'a pu être mené à terme suite à un problème technique avec le spectromètre.

II.2.3.3 ANALYSE CHIMIQUE : TENEUR EN CARBONE, AZOTE ET MATIERE SECHE

Les pots de terre fine destinés aux analyses ont été envoyés au laboratoire de Saint-Denis pour connaître la teneur en carbone (ainsi qu'en azote et en Matière Sèche), calculer les SCO et les comparer aux résultats obtenus par la méthode MIR et PIR.

II.2.3.4 BILAN : TROIS PROTOCOLES EN UN, AFIN DE TESTER L'EFFICACITE DE LA METHODE MIR IN SITU

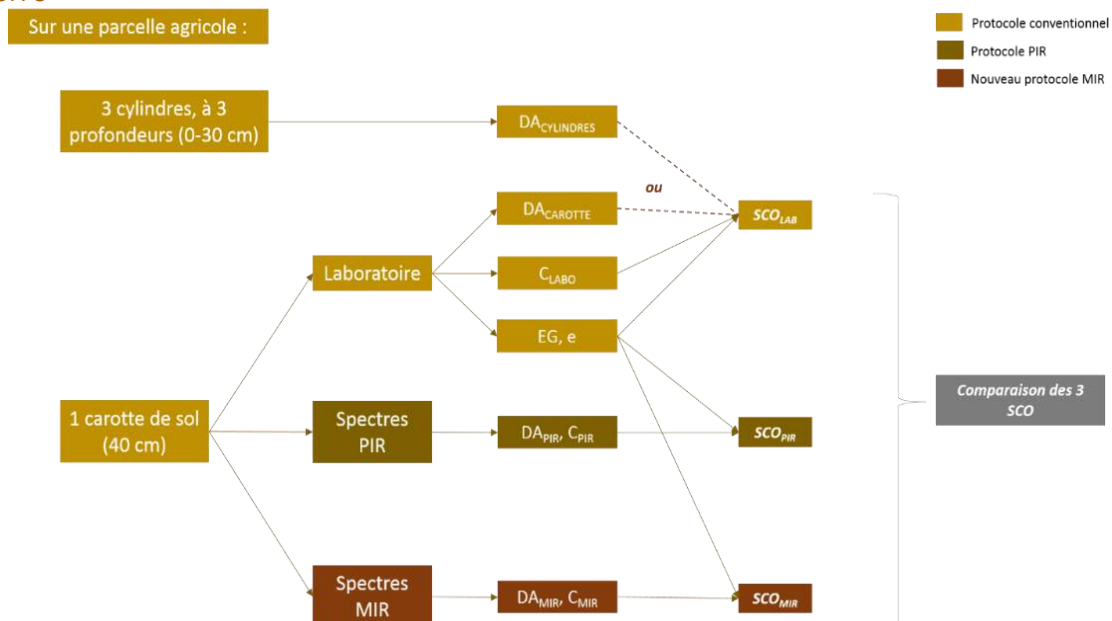


Figure 15 : Protocole de vérification de l'efficacité du protocole MIR - Source : Personnelle

II.2.4 TRAITEMENT DES DONNEES SPECTRALES

Afin d'analyser les spectres, trois tables Excel ont été réalisées. Une première contenant les spectres MIR ATR TERRAIN/ LABO, une deuxième présentant les spectres MIR DRIFT Terrain/Labo de 2016/2017 et pour finir, une table PIR Terrain/Labo de 2016 et 2017. A ces tables ont été ajoutées des variables quantitatives (teneur en carbone, teneur en eau, SCO et DA) et des variables qualitatives (types de sols, méthode IR, année d'acquisition, type de culture).

Avant tout traitement, les spectres aberrants, souvent dus à une mauvaise mesure de l'appareil, ont été retirés des tables et les 5 répétitions de spectre d'un échantillon ont été moyennées, afin qu'à un échantillon ne corresponde qu'un spectre. Les parties du spectre perturbées par l'appareil de mesure et n'apportant pas d'information ont été supprimées. Cela concerne les longueurs d'ondes inférieures à 1020 nm pour le PIR et les nombres d'ondes supérieures à 715 cm^{-1} pour le MIR DRIFT. Le MIR ATR n'a pas eu besoin d'être modifié.

La dernière étape est le traitement des spectres grâce au logiciel The Unscrambler, l'objectif étant de trouver la ou les combinaison(s) de traitements optimisant au mieux les modèles de prédictions. En effet, il est nécessaire de supprimer les déformations des spectres apparues lors de l'acquisition en appliquant des prétraitements. Ces déformations peuvent être de type multiplicatif (plus l'intensité d'absorption est grande, plus la dispersion des spectres est grande), additif (l'effet ne dépend pas de l'intensité d'absorption, il est aussi fort dans les zones faibles que fortes) ou une combinaison des deux (BOULET J.C., 2016). En MIR DRIFT et en PIR, les effets sont surtout additifs (Fig.16 et Fig.18) et les prétraitements possibles sont le lissage (diminution du bruit), la baseline (diminution de la ligne de base), le SNV (centré-normé) et la 2ème dérivée. En ATR, les déformations sont de type multiplicatif (Fig. 17). Les traitements à tester sont principalement la SNV, avec du lissage (mise en évidence de l'importance des pics d'absorption des uns par rapport aux autres) (BOULET J.C., 2016).

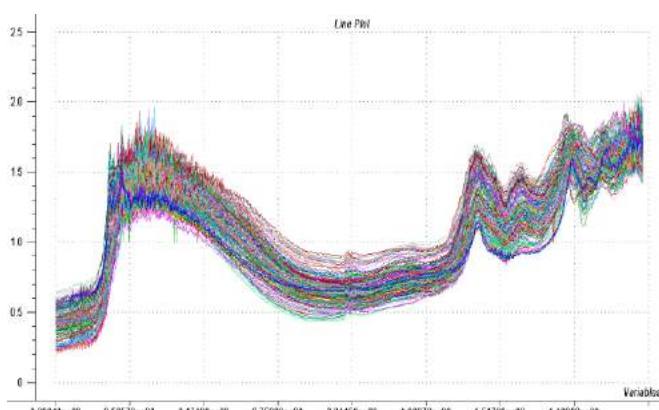


Figure 16 : Spectres MIR DRIFT bruts avec effets additifs - Source : obtenu avec The Unscrambler

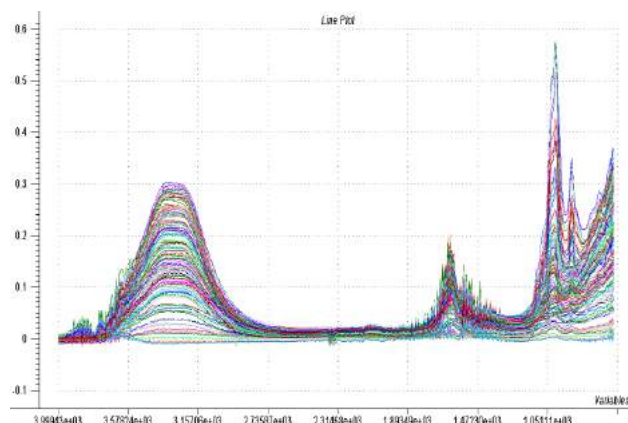


Figure 17 : Spectres MIR ATR bruts avec effets multiplicatifs- Source : obtenu avec The Unscrambler

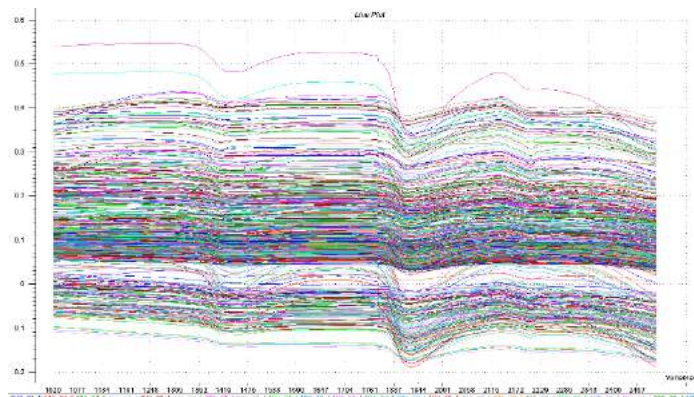


Figure 18 : Spectres PIR DRIFT bruts avec effets additifs - Source : obtenu avec The Unscrambler

Les bandes d'absorption des spectres de sols sont particulièrement difficiles à interpréter telles quelles, étant donné le nombre important de composés minéraux et organiques qui s'expriment. De plus, les spectres dépendent beaucoup des paramètres physiques des sols. L'absorbance ne sera pas la même en fonction de la taille et de la forme des particules car ces dernières affectent le trajet de la lumière. Dans le cas du moyen infrarouge, les vibrations sont relativement distinctes les unes des autres, mais dans le cas du proche infrarouge, les harmoniques se superposent. C'est pourquoi les modèles de prédiction se basent sur une approche multivariée, ici la PLS, qui prend en compte l'ensemble du spectre et non plus un ou plusieurs pics caractéristiques de l'élément considéré (GENOT V., 2014 ; REEVES J., 2002).

Les modèles ont été élaborés en validation croisée en raison du faible nombre d'échantillons : une centaine pour l'ATR et environ 200 pour les autres.

III. ANALYSE DES RESULTATS

Dans cette partie, nous allons comparer l'efficacité de la méthode MIR par rapport à la méthode PIR concernant la prédiction stocks en carbone organique.

III.1 SIMPLIFICATION DU PROTOCOLE : COMPARAISON $DA_{CYLINDRES}/DA_{CAROTTE}$

Un ajustement linéaire entre les valeurs de DA obtenues avec les spectres MIR des carottes de sol et celles calculées plus classiquement à partir des cylindres de sol a été testé (Fig.19).

Le coefficient de régression (0,83) suggère une assez bonne corrélation entre les deux méthodes. De plus, il est conforté par la pente de la droite d'ajustement (0,78), qui est relativement proche de 1. Cependant, la position de cette droite au-dessus de la première bissectrice, montre que le procédé utilisant les carottes de sol a tendance à surestimer les valeurs de DA, en particulier lorsque celles-ci sont faibles. Les carottes ayant été prélevées à l'aide d'un perceur, il est possible que cela ait plus ou moins tassé le sol à l'intérieur de la gouge et on peut supposer qu'un sol de faible densité est plus enclin à se compacter qu'un sol dense.

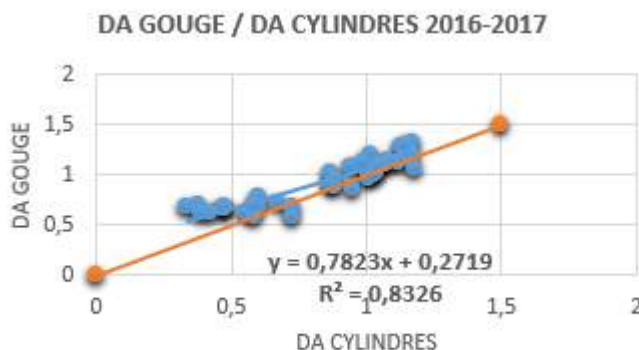


Figure 19 : Comparaison des mesures de DA 2017

La correction est toutefois mathématiquement possible, ce qui autorise une simplification du protocole présenté Figure 15, en supprimant l'utilisation des cylindres.

III.2 RESULTATS PRELIMINAIRES

III.2.1 CHOIX DES GROUPES D'ÉCHANTILLONS A TRAITER

L'un des objectifs du projet est de déterminer quelle est la méthode la plus fiable, que ce soit pour le PIR ou le MIR. C'est pourquoi les échantillons Terrain et Laboratoire ont été traités séparément. De plus, l'Analyse en Composante Principale (ACP) des spectres sépare clairement ces deux groupes dans les différents cas (Annexe 3). Cependant, les spectres MIR DRIFT Terrain étant très peu nombreux (9), les modèles ont été réalisés uniquement sur les spectres MIR DRIFT Laboratoire. Concernant le MIR ATR, cette fois ce sont les spectres Laboratoire, trop peu nombreux (une quinzaine) du fait d'un problème technique, qui n'ont pas été traités.

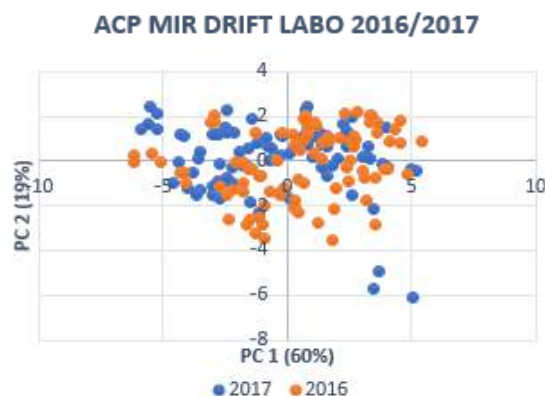


Figure 20 : ACP MIR DRIFT LABO 2016/2017

Sur les spectres MIR DRIFT Laboratoire, l'ACP (Fig.20) met en évidence l'homogénéité entre les mesures de 2016 et celles de 2017, ce qui a permis de les traiter ensemble et d'avoir un échantillonnage plus important. A propos du MIR ATR, aucune mesure n'a été réalisée en 2016.

En ce qui concerne le PIR, l'ACP met en évidence une nette différence entre 2016 et 2017 (Fig.21 et 22). Cependant, cette différenciation n'est pas due à un changement d'acquisition des spectres entre les deux années, mais plutôt à une différence de type d'occupation des sols (Fig.22). Les sites d'étude de 2016 se concentraient sur les sols sous canne à sucre et sous prairies (ROSIES B., 2016), alors que les sites de 2017 couvraient le maraîchage et la culture d'ananas. Le but était de comparer le stockage du carbone en fonction de l'occupation du sol, en partant de l'hypothèse que la canne à sucre et les prairies stockent plus de carbone que le maraîchage et la culture d'ananas (RAMOS M., 2017). Ici, l'ACP met en évidence la différence de comportement des sols sous prairies et canne à sucre par rapport à ceux sous maraîchage et ananas.

De ce fait, les spectres 2016 et 2017 ont quand même été traités conjointement.

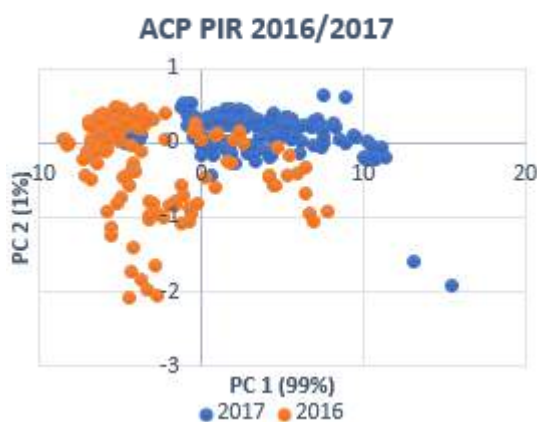


Figure 21 : ACP PIR 2016/2017

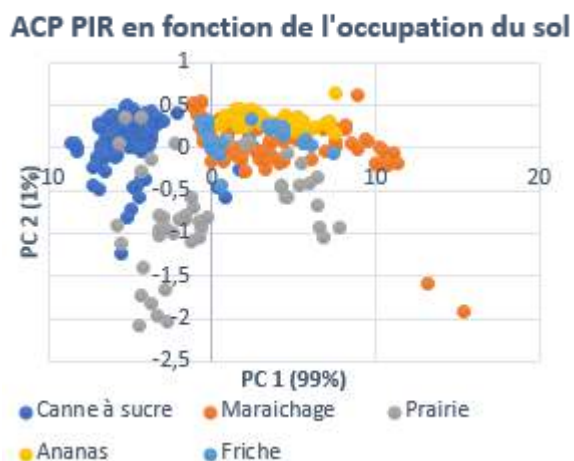


Figure 22 : ACP PIR en fonction de l'occupation du sol

III.2.2 MISE EN EVIDENCE DE L'IMPORTANCE DES PRETRAITEMENTS POUR L'ANALYSE DES SPECTRES ET LA CONSTRUCTION DES MODELES

La réalisation d'une ACP sur les spectres DRIFT (Fig.23) et ATR (Fig.24) montre que sans prétraitements, il est difficile de distinguer des groupes, en particulier si l'on prend l'exemple du type de sol. En effet en DRIFT, tous les échantillons se superposent, rendant une conclusion difficile. En ATR, l'organisation des échantillons selon l'axe 1 (PC1 expliquant 85% de la répartition) met en évidence la qualité de l'absorbance : les spectres aux valeurs faibles sont à droite et ceux aux valeurs élevées à gauche. Cependant, l'axe 2, qui explique 13% de la répartition, semble faire la distinction sols andiques et non andiques.

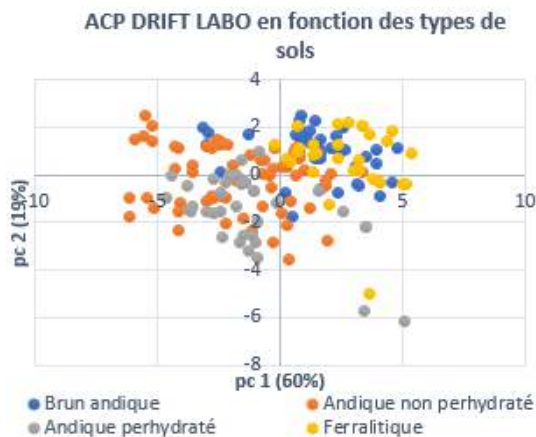


Figure 23 : ACP DRIFT LABO en fonction des types de sols

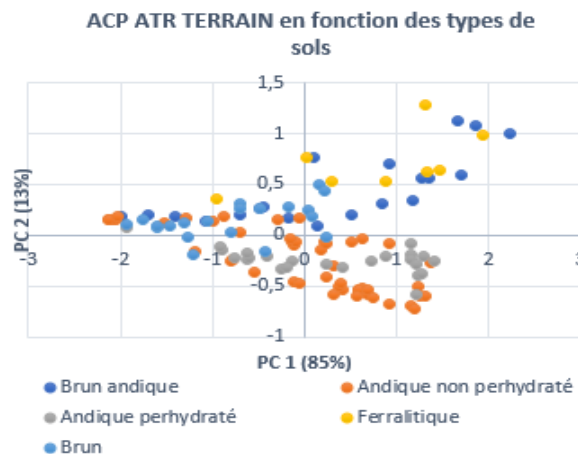


Figure 24 : ACP ATR TERRAIN en fonction des types de sols

En testant différents prétraitements, le résultat de l'ACP change et des rassemblements s'opèrent. En DRIFT (après lissage, SNV, baseline et 2^{ème} dérivée) (Fig.25) et en ATR (après lissage+SNV) (Fig.26), des groupes se forment de façon bien plus marquée sur l'axe 1. Ces groupes semblent correspondre aux types de sols, au moins pour le DRIFT.

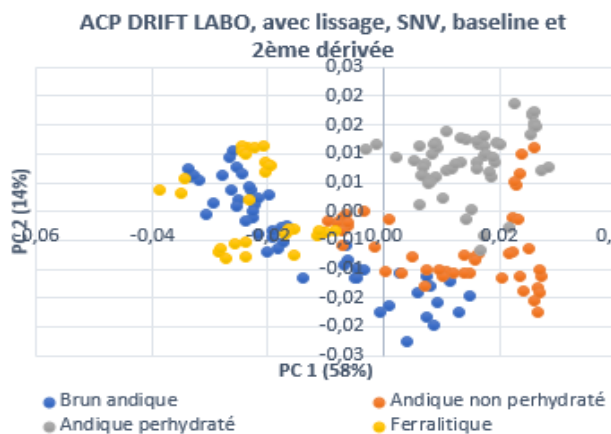


Figure 25 : ACP MIR DRIFT LABO avec prétraitements

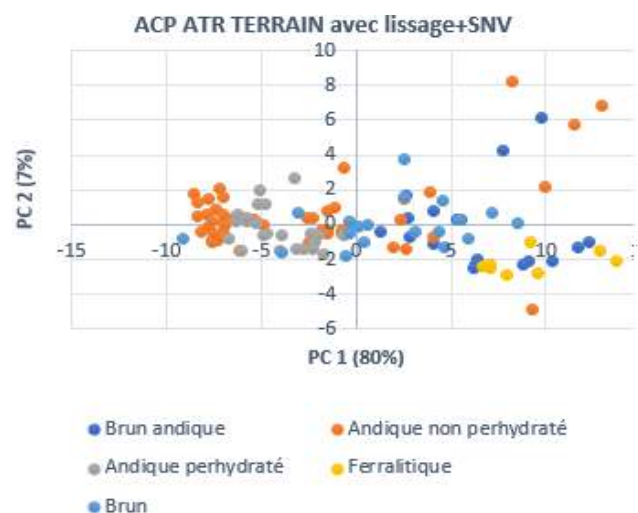


Figure 26 : ACP ATR TERRAIN avec lissage+SNV

En ce qui concerne le PIR, les résultats sont différents. Il a été montré figure 22 que l'ACP des spectres bruts différencie les spectres faits sur sol sous canne à sucre et prairies des autres. Après prétraitements, deux groupes apparaissent toujours, mais moins clairement qu'auparavant et ce n'est

plus l'occupation du sol qui les différencie (Fig.27 et 28). Le type de sol ne semble pas non plus expliquer cette ségrégation.

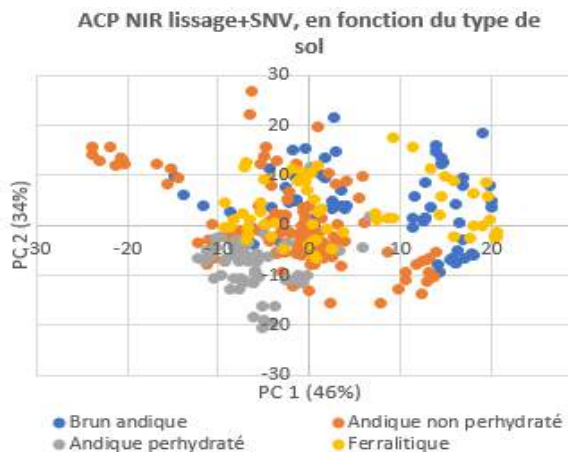


Figure 27 : ACP PIR lissage+SNV, en fonction du type de sol

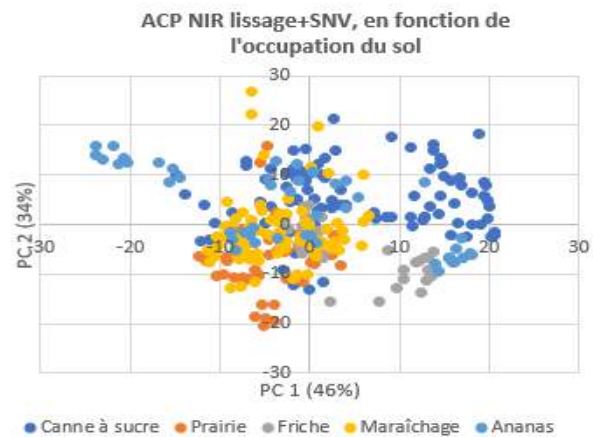


Figure 28 : ACP PIR lissage+SNV, en fonction de l'occupation du sol

Ainsi, l'application de prétraitements sur les spectres MIR et PIR permet de mettre en évidence les différences et les points communs des spectres en contrant leurs déformations, donc de faciliter leur lecture et leur classement par groupe. Si les spectres sont moins déformés, les modèles mis en place seront également plus fiables.

III.2.3 PARAMETRES DE FIABILITE D'UN MODELE

La fiabilité des modèles a été testée par une méthode de validation croisée du fait du nombre d'échantillons entre 100 et 200. Les paramètres choisis, jugeant la fiabilité, sont au nombre de 3 (CAMBOU A., 2015 ; GENOT V., 2014) :

- Le R^2 ou coefficient de détermination

Il s'agit du coefficient de détermination entre une variable de prédiction x et une variable prédite y . Il explique la fraction de la variance de y « expliquée » par la corrélation de y avec x . En pratique, une valeur de r^2 supérieure à 0,9 indique une bonne réponse de la spectroscopie PIR pour le paramètre. Entre 0,9 et 0,7 la réponse est moyenne et doit être améliorée par l'ajout d'échantillons ou par la modification de certains paramètres du modèle. En dessous de 0,7 la réponse est considérée comme mauvaise (GENOT V., 2014).

- Le RMSE ou l'erreur quadratique moyenne

C'est un paramètre de mesure de l'erreur de prédiction, qui correspond à la racine carrée de la moyenne de la différence entre la valeur mesurée et la valeur prédite (GENOT V., 2014). Plus il est faible, plus le résultat du modèle est fiable.

- Le RPD

Il s'agit du rapport entre la déviation standard du lot de données d'étalonnage pour le paramètre observé (suivant la mesure obtenue par la méthode de référence) et le RMSE. Plus le RDP est élevé, meilleure sera la qualité de la prédiction. Si $RDP < 1,4$ il est considéré comme mauvais, si $1,4 < RDP < 2$ il est moyen et si $RDP > 2$, il est bon (GENOT V., 2014).

$$RDP = Sdev/RMSE$$

III.3 COMPARAISON DE LA FIABILITE DES MODELES MIR ET PIR

Lors de l'élaboration d'un modèle, il est toléré de retirer jusqu'à 10% des échantillons considérés comme des outliers du modèle de prédiction. Il était donc possible d'enlever 12 outliers en MIR ATR ainsi que 18 en MIR DRIFT et en PIR. Afin d'illustrer les régressions PLS, l'exemple de la modélisation des stocks en carbone organique a été choisi, l'objectif principal de ce stage étant de déterminer la meilleure méthode de prédiction des SCO.

III.3.1 LA NOUVELLE METHODE MIR

III.3.1.1 LE LABORATOIRE (SPECTRES DRIFT)

Spectres bruts					Lissage					Lissage + SNV					Lissage + SNV + baseline					Lissage+ SNV+ baseline + 2 ^{ème} Dérivée				
	O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP
C	3	0.8	10.1	2.5	C	9	0.8	10.0	2.6	C	12	0.8	10.3	2.5	C	11	0.8	10.1	2.5	C	12	0.8	9.8	2.6
W	8	0.5	0.2	1.6	W	10	0.5	0.2	1.7	W	13	0.6	0.1	1.9	W	12	0.5	0.1	1.8	W	12	0.6	0.2	1.7
DA	13	0.7	0.1	1.9	DA	12	0.7	0.1	2	DA	12	0.7	0.1	1.9	DA	7	0.7	0.1	1.9	DA	12	0.7	0.1	1.9
SCO	9	0.8	6.7	2.7	SCO	9	0.9	6.3	2.9	SCO	13	0.8	6.6	2.7	SCO	12	0.8	7.1	2.5	SCO	12	0.8	6.6	2.7

Tableau 1: Paramètres de fiabilité des modèles en fonction des prétraitements, O : Outliers , C : teneur en carbone, W : teneur en eau

En DRIFT, les spectres bruts permettent déjà d'obtenir des modèles de prédictions corrects (sauf pour la teneur en eau), avec des R² compris entre 0,9 et 0,7 et des DRP > 1,4 (Tab.1 et Fig.29). Mais les valeurs étant malgré tout moyennes, différents prétraitements ont été appliqués.

Les résultats obtenus sont fortement similaires voire identiques aux résultats sans prétraitements (Fig.29 et 30, Tab1). C'est le cas des R² de la combinaison de prétraitements lissage+SNV+baseline du tableau 1. Ainsi, les traitements n'améliorent pas les modèles de prédictions.

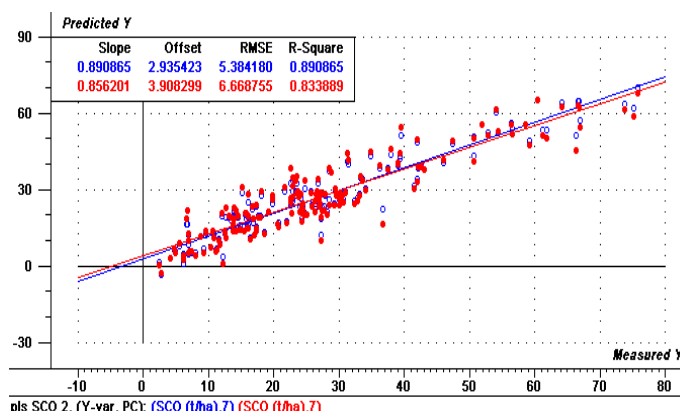


Figure 29 : PLS des SCO sur spectres MIR DRIFT bruts

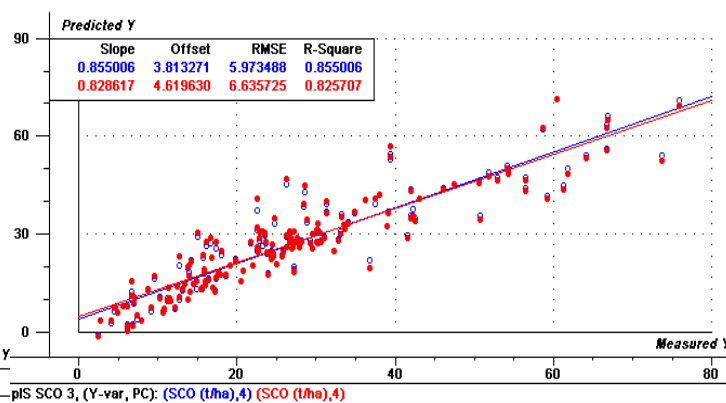


Figure 30 : Régression PLS des SCO sur spectres MIR DRIFT avec lissage, SNV, baseline et 2ème dérivée

III.3.1.2 LE TERRAIN (SPECTRES ATR)

Spectres bruts					Lissage					Lissage + SNV				
	O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP
C	7	0.5	16.9	1.7	C	12	0.5	17.2	1.7	C	11	0.7	13.9	2.0
W	8	0.6	0.1	1.8	W	12	0.6	0.1	2.3	W	11	0.7	0.1	2.6
DA	9	0.6	0.2	1.8	DA	12	0.6	0.2	1.7	DA	9	0.7	0.1	2.2
SCO	11	0.5	12.1	1.5	SCO	12	0.1	14.1	1.3	SCO	12	0.6	10.6	1.8

Tableau 2 : Paramètres de fiabilité des modèles de prédiction en ATR, la couleur verte indique une amélioration significative de paramètres

Sans prétraitements, les prédictions sont mauvaises, en particulier pour la teneur en carbone et les SCO, avec des R^2 bien inférieurs à 0,7 et des RMSE>10. Les RDP sont corrects, avec des valeurs supérieures à 1,4 (Tab.2 et Fig.31).

Cependant, les prétraitements ont, cette fois, été efficaces notamment la combinaison lissage+SNV. L'amélioration n'est significative que pour la teneur en carbone et les SCO, où le RMSE passe respectivement de 16,9 à 13,9 et de 12,1 à 10,6 (Tab.2 et Fig.32). Mais il y a aussi un effet global, les R^2 passent presque tous au-dessus de 0,7 et les RDP au-dessus de 2. Tous paramètres confondus, ce sont les prédictions de la teneur en eau et de la DA qui semblent les plus fiables, avec un RMSE de 0,1.

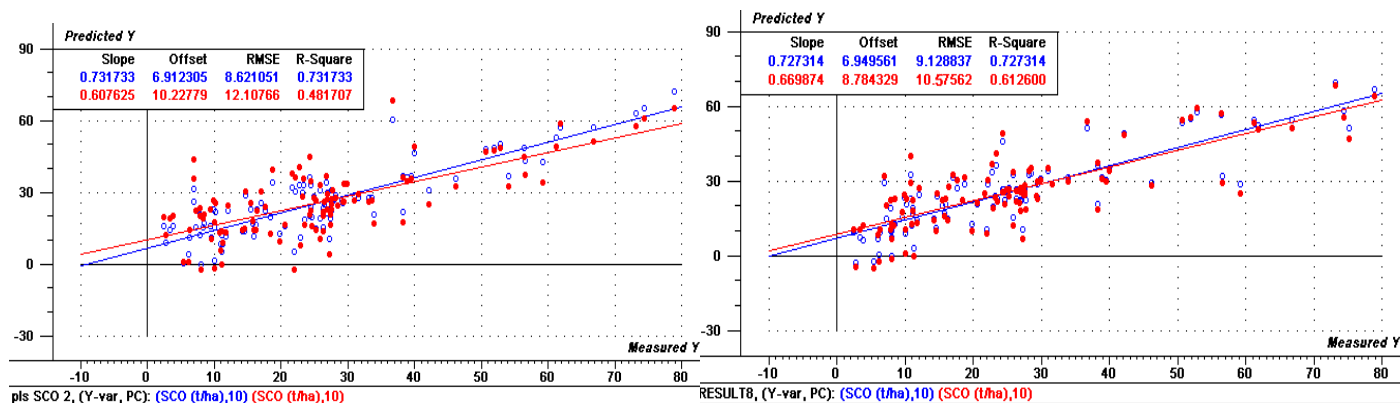


Figure 32 : Régression PLS des SCO sur spectres ATR prétraînés (Lissage+SNV)

III.3.2 LE PIR

III.3.2.1 LE LABORATOIRE

Spectres bruts					Lissage					Lissage + SNV				
	O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP
C	6	0.9	9.9	3.1	C	14	0.9	8.5	3.6	C	13	0.8	11.5	2.6
W	9	0.7	0.1	1.9	W	13	0.7	0.1	2.3	W	15	0.7	0.1	2
DA	6	0.7	0.1	1.8	DA	11	0.7	0.1	1.9	DA	13	0.8	0.1	2.1
SCO	10	0.7	8.4	2.2	SCO	14	0.8	8.3	2.2	SCO	14	0.8	8.0	2.3

Tableau 3 : Paramètres de fiabilité des modèles de prédiction en PIR Laboratoire

Les spectres bruts permettent déjà d'obtenir des modèles de prédiction corrects, avec des R^2 compris entre 0,7 et 0,9, des RMSE<10 et des RDP très supérieurs à 1,4, atteignant même 3 pour la teneur en eau (Tab.3 et Fig.33). Les prétraitements appliqués afin d'améliorer les modèles n'ont pas permis de modifier significativement les prédictions (Tab.3 et Fig.34).

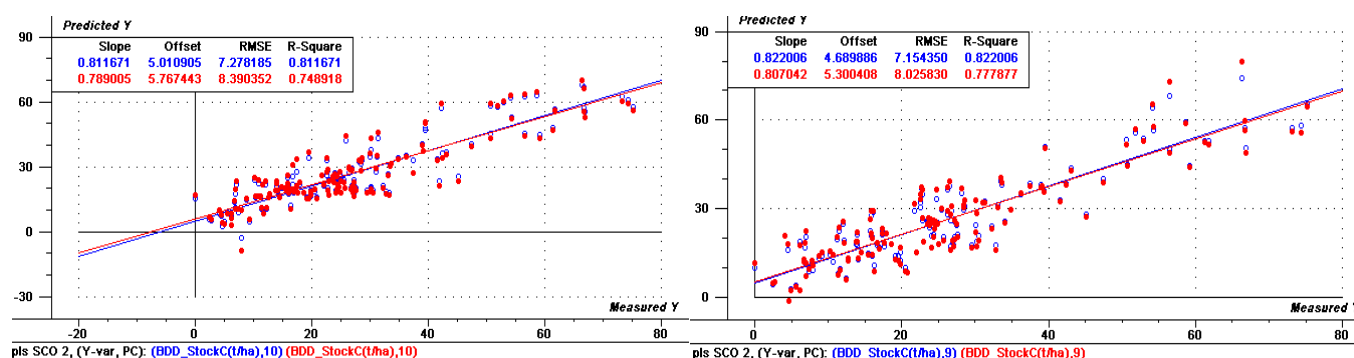


Figure 34 : Régression PLS des SCO sur spectres PIR LABO avec lissage + SNV

III.3.2.2 LE TERRAIN

Spectres bruts					Lissage					Lissage + SNV				
	O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP
C	5	0.8	13.3	2.2	C	7	0.7	14.9	2.0	C	15	0.8	12.8	2.3
W	2	0.8	0.1	2.4	W	7	0.7	0.1	2.2	W	13	0.8	0.1	2.9
DA	6	0.7	0.1	1.9	DA	6	0.7	0.1	1.9	DA	15	0.8	0.1	2.7
SCO	7	0.6	10.8	1.7	SCO	12	0.6	9.7	1.9	SCO	13	0.6	9.4	2.0

Tableau 4 : Paramètres de fiabilité des modèles en PIR Terrain

Les prédictions sur spectres bruts sont correctes, avec des $R^2 > 0,7$ (sauf pour les SCO) et des $RDP > 0,6$ (Tab.4 et Fig.35). Par contre, les $RMSE > 10$ de la teneur en carbone et des SCO ne sont pas bons. De plus, les prétraitements n'améliorent pas significativement la fiabilité des prédictions (Tab.4 et Fig.36).

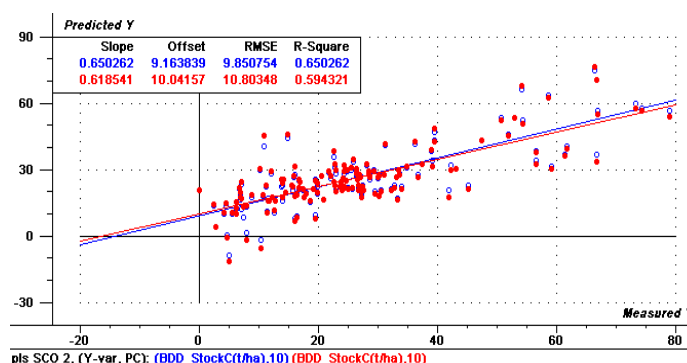


Figure 351 : Régression PLS des SCO sur spectres bruts

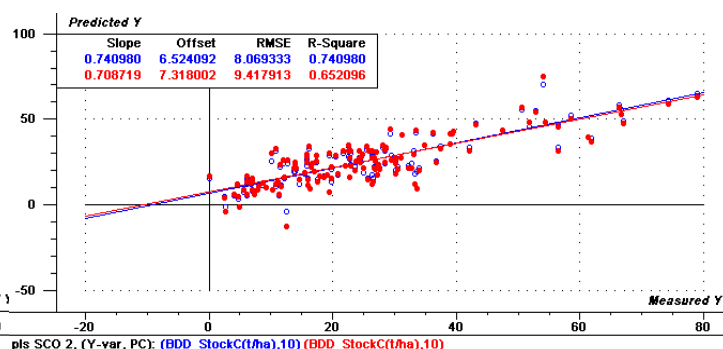


Figure 36 : Régression PLS des SCO sur spectres avec lissage+SNV

III.3.3 COMPARAISON PIR/MIR, LABO/TERRAIN

Les meilleures prédictions en terrain et en laboratoire, pour le PIR et le MIR, sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tab.5).

MIR					PIR				
DRIFT : Spectres bruts					ATR : Lissage + SNV				
	O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP
C	3	0.8	10.1	2.5	C	11	0.7	13.9	2.0
W	8	0.5	0.2	1.6	W	11	0.7	0.1	2.6
DA	13	0.7	0.1	1.9	DA	9	0.7	0.1	2.2
SCO	9	0.8	6.7	2.7	SCO	12	0.6	10.6	1.8

Labo : Spectres bruts					Terrain : Spectres bruts				
	O	R ²	RMSE	RDP		O	R ²	RMSE	RDP
C	6	0.9	9.9	3.1	C	5	0.8	13.3	2.2
W	9	0.7	0.1	1.9	W	2	0.8	0.1	2.4
DA	6	0.7	0.1	1.8	DA	6	0.7	0.1	1.9
SCO	10	0.7	8.4	2.2	SCO	7	0.6	10.8	1.7

Tableau 5 : comparaison des meilleures prédictions MIR/PIR et LABO/TERRAIN, les valeurs considérées comme correctes : $R^2 > 0,9$, $RMSE < 10$ et un $RDP > 2$, apparaissent en vert dans le tableau

Globalement, il est difficile de conclure sur une méthode donnant les meilleures prédictions pour toutes les variables. Il nécessaire d'étudier ces dernières au cas par cas, comme le montre le tableau 6 ci-dessous.

VALEUR À PRÉDIRE	MÉTHODE DONNANT LA MEILLEURE PRÉDICTION	R ²	RMSE	RDP
C	PIR LABO	0.9	9.9	3.1
W	PIR ou MIR TERRAIN	0.7	0.1	2.6
DA	MIR TERRAIN (méthodes toutes équivalentes)	0.7	0.1	2.2
SCO	MIR LABO	0.8	6.7	2.7

Tableau 6 : Récapitulatif des meilleures méthodes de prédictions suivant chacune des variables

III.3.4 COMPARAISON DES PREDICTIONS DES STOCKS EN CARBONE ORGANIQUE

Le but de ce projet est de déterminer s'il est possible de prédire les SCO et si oui, de choisir la méthode la plus efficace. La figure 37 présente les trois paramètres de fiabilité des modèles de prédiction pour les SCO, en fonction des meilleures méthodes MIR/PIR et Terrain/Laboratoire.



Figure 37 : Comparaison des trois paramètres de fiabilité du modèle de prédiction des SCO en fonction des meilleures méthodes MIR/PIR et TERRAIN/LABO

Pour les 3 paramètres, l'ordre est toujours le même, du meilleur (à gauche) au moins bon (à droite) (Fig.37). Deux groupes se distinguent : celui des méthodes laboratoire et celui des méthodes terrain. On notera que les méthodes laboratoire possèdent les paramètres les plus fiables. Pour le RMSE et le RDP, les méthodes laboratoire sont respectivement en dessous de 10 et au-dessus de 2. En ce qui concerne le R^2 les valeurs, plus regroupées que les précédentes, restent correctes car elles sont supérieures à 0,7.

De plus, la différence MIR/PIR est toujours la même au sein de ces deux groupes (Fig.37) : le MIR apparaît comme meilleur que le PIR. Cependant, si ce classement est visible pour les méthodes laboratoire, il est beaucoup moins évident pour les méthodes terrain.

Ainsi, les méthodes laboratoire semblent plus fiables que celles du terrain et le MIR paraît meilleur que le PIR en ce qui concerne les SCO. La méthode assurant les meilleures prédictions est le MIR DRIFT Laboratoire, avec un R^2 de 0,8 ; un RMSE de 6,7 et un RDP de 2,7.

IV. PRECISIONS QUE LES RESULTATS DISCUSSION

Il convient de rappeler que les résultats dits « 2017 » sont issus de l'analyse conjointe des mesures effectuées en 2016 et en 2017.

IV.1 RESULTATS PRELIMINAIRES

IV.1.1 LE MIR

Les groupes de l'ACP MIR DRIFT figure 25 différencient les sols non cristallisés à gauche et les sols cristallisés à droite. Cela se vérifie en analysant les loadings (Fig.38), qui donnent les pics associés ici à l'axe 1. Autour de $3\,700\text{ cm}^{-1}$, le pic est dû à la présence d'argile (HIDALGO C., 2010), donc de matériaux cristallisés, tandis que le pic autour de $1\,100\text{ cm}^{-1}$ indique la présence d'allophanes (THENG E.B.K.G.,

1980), donc de matériaux amorphes. En ATR, après un lissage et une SNV (Fig.27), l'axe 1 de l'ACP, qui explique 80% de la répartition, ne classe plus les spectres selon leur forte ou faible absorbance, mais selon la présence de matériaux cristallisés ou non cristallisés. En effet, sur le graphique des loadings (Fig.39), les pics 1 030 cm^{-1} et 900 cm^{-1} sont révélateurs de la présence conjointe de matériaux amorphes (allophanes) et d'halloysites. Le pic de 3 700 cm^{-1} est, quant à lui, caractéristique des allophanes (THENG E.B.K.G., 1980 ; HIDALGO C., 2010).

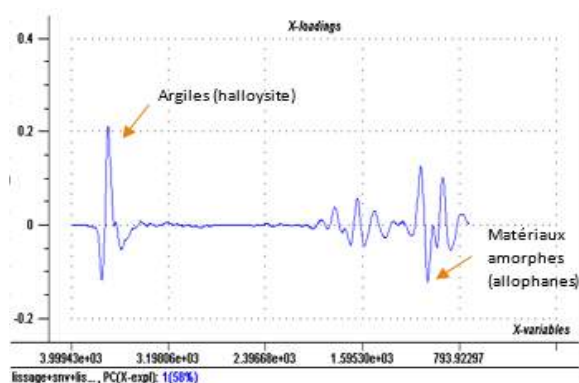


Figure 38 : X-loadings (PC 1) de l'ACP DRIFT LABO

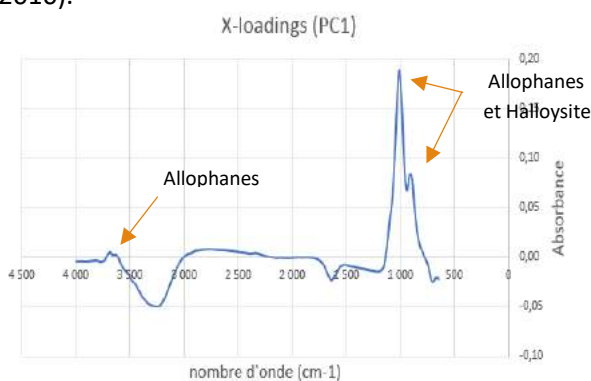


Figure 39 : X-loadings (PC 1) de l'ACP ATR TERRAIN

IV.1.2 LE PIR

La figure 40 met en évidence que c'est l'eau qui différencie les groupes des ACP 29 et 30 selon l'axe 1. La teneur en eau étant fortement conditionnée par la présence des allophanes à La Réunion, il aurait donc été possible de penser que ces dernières régissaient la différenciation. Or les types de sols dépendent des allophanes et il a été montré figure 29 que ce n'était pas ce facteur qui différenciait les groupes.

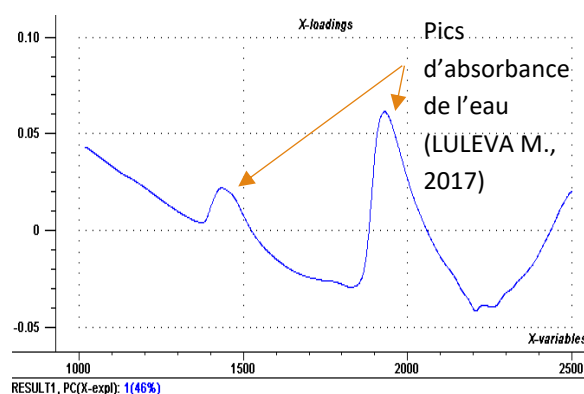


Figure 40 : X-loadings PC1 de l'ACP PIR avec prétraitements

IV.2 LA TENEUR EN EAU

Les modèles de prédictions testés ici sont incapables de prédire les valeurs supérieures à 100% de teneur en eau. Une hypothèse serait que les échantillons correspondants suivent un modèle de prédiction différent. Cependant, même en n'utilisant que les échantillons aux teneurs en eau élevées, il est impossible de construire un modèle de prédiction concluant. Il serait intéressant de refaire ce test avec un nombre plus élevé d'échantillons.

IV.3 LA DENSITE APPARENTE

Avec un R^2 autour de 0,7 ; un RMSE de 0,1 et un RDP d'environ 1,9 la prédiction de la DA aussi bien en MIR qu'en PIR semble possible, même s'il est nécessaire d'affiner le modèle. Ces résultats sont meilleurs que ceux obtenus en 2016 par CAMBOU *et al.* (en PIR), dont le R^2 varie entre 0,5 et 0,6 pour un RDP de 1,5 à 1,7 et pour qui la prédiction de la densité apparente était donc impossible.

La DA est un paramètre physique et non chimique ou minéralogique et il est normalement impossible de la prédire à partir d'un spectre. Mais le fait qu'elle soit bien prédite en spectroscopie MIR comme

en NIR laisse imaginer qu'il existe un élément bien détecté par ces méthodes étroitement corrélé à la densité apparente. Comme cela a été constaté l'année dernière au CIRAD (STERNE M., 2016), les valeurs de DA sont les mêmes sur le terrain et au laboratoire, où les sols sont pourtant séchés, tamisés et broyés à 200µm. Ils perdent donc leur structure et leur humidité. A La Réunion, il existe un matériau amorphe qui influence très fortement la DA du fait de sa structure sphérique et creuse : les allophanes. Plus il y a d'allophanes dans un sol et plus sa DA est faible. Ainsi, comme le concluait également Magalie STERNE, la bonne prédiction de la DA à La Réunion serait due à la présence d'allophanes.

Cependant, les résultats de 2017 sont moins bons que ceux obtenus en 2016 (R^2 de 0,8 ; RMSE de 0,1 et RDP de 2,3). Il est possible que l'augmentation du nombre d'échantillons testés par rapport à l'année dernière (180 contre 99), combinée au fait que les sols de La Réunion présentent des caractéristiques très différentes, aient fait diminuer la fiabilité des prédictions.

IV.4 PREDICTION DE LA TENEUR EN CARBONE ORGANIQUE

Selon les résultats obtenus, la prédiction de la teneur en carbone organique est meilleure en PIR qu'en MIR, que ce soit sur le terrain ou en laboratoire. Cela paraît surprenant, car de nombreux auteurs ont démontré la supériorité du MIR dans la prédiction de la teneur en carbone (MCDOWELL M.L., 2012 ; RAZAFIMBELO-ANDRIAMIFIDY T., 2010 ; SILA A., 2016 ; ROBERTSON A.H.J., 2013). Par exemple, des chercheurs (PIRIE A., 2003) signalent des coefficients de corrélation pour le MIR de $0,79 < R^2 < 0,92$ et pour le PIR de $0,53 < R^2 < 0,87$ alors que le meilleur R^2 obtenu ici en MIR est de 0,8 et le meilleur en PIR est de 0,9. Peut-être serait-il nécessaire de refaire les mesures en augmentant le nombre d'échantillons testés.

De plus, en comparant les valeurs PIR de 2017 à celles de 2016 (STERNE M., 2016), les paramètres obtenus cette année sont beaucoup moins bons. Les R^2 des méthodes PIR Terrain et Laboratoire sont de 0,9 et cela, sans supprimer d'outliers. L'hypothèse faite ici est la même que celle énoncée ci-dessus pour la densité apparente.

IV.5 LA PREDICTION DES STOCKS EN CARBONE ORGANIQUE

IV.5.1 EN PIR

La prédiction des SCO en PIR Laboratoire donne des résultats plutôt satisfaisants : R^2 de 0,7 ; RMSE de 8,4 et RDP de 2,2. Cependant, ces résultats sont plus faibles que ceux obtenus en 2016, qui présentent un R^2 de 0,8 ; un RMSE de 7,1 et un RDP de 2,5.

Sur le terrain la constatation est plus flagrante. En effet, en 2017 le R^2 est de 0,6 ; le RMSE de 10,8 et le RDP de 1,7 alors qu'en 2016, le R^2 est de 0,8 ; le RMSE de 8,1 et le RDP de 2,4. Si la prédiction est correcte en 2016, elle devient mauvaise en 2017.

De même que pour la DA et la teneur en carbone, ces mauvaises prédictions pourraient s'expliquer par l'augmentation du nombre d'échantillons. Ces derniers proviennent de différents types de sols, sous couvert végétal varié. Donc plus il y a d'échantillons et plus cela apporte de la variabilité dans le modèle. Il a été montré (partie 1) que le paramètre le plus déterminant dans le stockage du carbone était le type de sol (GOGE F., 2014). Le couvert végétal joue aussi un grand rôle (ALBRECHT A., 1992 ; RAMOS M., 2017). Entre 2016 et 2017, seul un type de sol (le sol brun) a été ajouté mais les effectifs

de chaque type de sol déjà présent (5) en 2016 ont aussi augmenté. De plus, alors que seules la canne à sucre et les prairies étaient étudiés en 2016, le maraîchage et l'ananas ont été ajoutés en 2017. Ainsi, la variabilité a augmenté, ce qui doit impacter négativement le modèle de prédiction.

IV.5.2 EN MIR

- Le terrain

En ce qui concerne le MIR Terrain (R^2 de 0,6 ; RMSE de 10,1 et RDP de 1,8), les résultats sont trop faibles pour permettre une prédiction fiable. Il est nécessaire d'affiner le modèle, peut-être en augmentant le nombre d'échantillons ou en élaborant sur terrain un protocole de préparation du sol qui améliorerait les mesures. En effet, pour que le spectre ATR soit correctement pris, il faut que le sol soit bien en contact avec la fenêtre de mesure, ce qui n'est pas le cas lorsque le sol est trop sec. Cette situation a été rencontrée sur de nombreux sites de prélèvements. C'est pourquoi le modèle de prédiction a été élaboré avec une association de spectres fortement bruités ou non, ce qui a dû diminuer la fiabilité des résultats.

- Le laboratoire

Tout d'abord, les prédictions des SCO en MIR sont donc meilleures que les prédictions en PIR. Ceci va dans le sens des conclusions de nombreux travaux (BELLON-MAUREL V., 2009 ; REEVES J.B., 2010 ; ROBERTSON A.H.J., 2013). En effet, le MIR émet des ondes harmoniques, dont l'absorption est intense et les bandes obtenues très nettes (BARTHES B.G., s.d. ; VISCARRA ROSSEL R.A., 2006). Les spectres donnent des informations à la fois sur la matière organique et les minéraux. D'après MCDOWELL *et al.* en 2012, les méthodes d'analyse des sols donnent donc des résultats plus précis en MIR qu'en PIR.

Ensuite, la prédiction est meilleure en laboratoire que sur le terrain. Peu d'études ont été faites sur l'utilisation du MIR sur le terrain, la technologie étant en plein développement. Cependant, il est probable que les mesures faites en laboratoire, dans des conditions plus homogènes que sur le terrain (un sol sec et broyé à 200 μm en laboratoire contre un sol plus ou moins humide, à granulométrie changeante sur le terrain), permettent l'obtention de spectres moins bruités. En effet, en broyant le sol à 200 μm , les particules auront sensiblement la même taille et le trajet de la lumière sera quasiment le même pour tous les échantillons et ainsi, l'absorbance sera moins perturbée. Si les spectres sont moins bruités et moins déformés, alors il ne sera pas nécessaire d'appliquer des prétraitements pour « lire » l'information qu'ils contiennent. Ceci expliquerait que le MIR Laboratoire brut donne de meilleurs résultats que le MIR Laboratoire avec prétraitements.

Enfin, les valeurs des paramètres de fiabilité obtenues avec le MIR Laboratoire brut, soit un R^2 de 0,8 un RMSE de 6,7 et un RDP de 2,7 sont relativement bonnes. Cela permet de conclure que la prédiction des SCO via la technologie MIR en laboratoire est possible et que le résultat est fiable. Cependant, il serait intéressant d'affiner le modèle en augmentant le nombre d'échantillon testés.

Ainsi, la meilleure méthode de prédiction des SCO serait le MIR DRIFT Laboratoire sans prétraitements. Cependant, nous avons vu qu'il était possible de prédire la DA et la teneur en carbone, deux paramètres du calcul des SCO. Il serait alors pertinent de regarder s'il est plus intéressant de prédire les SCO ou de prédire les paramètres servant au calcul des SCO et de faire ensuite les calculs.

IV.6 EST-IL PREFERABLE DE PREDIRE LES SCO OU DE PREDIRE LES PARAMETRES SERVANT AU CALCUL DES SCO ?

Nous allons répondre à cette question en prenant comme exemple la régression donnant les meilleurs paramètres de prédiction des SCO, soit la régression faite sur les spectres bruts MIR Laboratoire (Fig.41). Cette figure va servir de référence.

En parallèle, de nouveaux SCO ont été calculés grâce aux valeurs de DA et de teneurs en carbone prédites en MIR Laboratoire. Ces stocks en carbone sont appelés *SCO Calculés*. Ces derniers ont été comparés aux valeurs des *SCO Mesurés*. Cette comparaison prend la forme d'une régression linéaire présentée Fig.42. Les deux régressions ont été faites avec le même jeu de données (138 valeurs).

En comparant les deux régressions, il apparaît que ce sont les *SCO Prédits* qui sont les plus proches des *SCO Mesurés* avec un R^2 de 0,8 (Fig.41) contre un R^2 de 0,7 pour les *SCO Calculés* (Fig.42). Il semblerait que ce soient les valeurs supérieures à 50 t/ha qui font chuter le coefficient de régression figure 42, alors que cela n'apparaît pas figure 41.

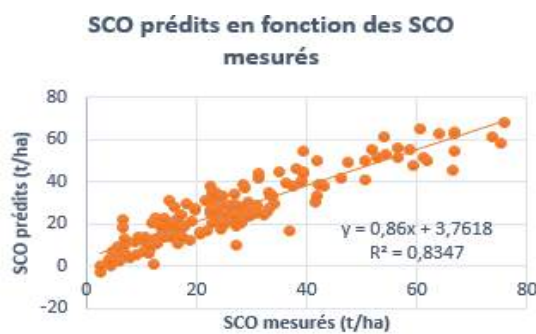


Figure 41 : SCO prédits en fonction des SCO mesurés

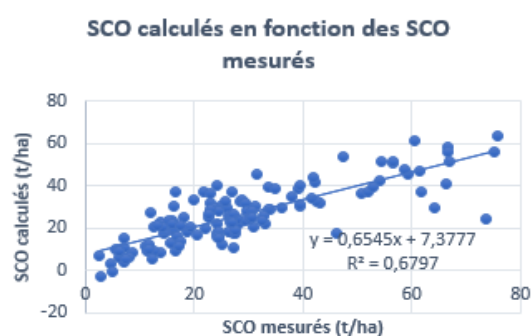


Figure 42 : SCO calculés en fonction des SCO mesurés

La régression de référence choisie ici était la meilleure concernant la prédiction des SCO, mais pas concernant la prédiction de la DA et de la teneur en carbone. Un deuxième test a été effectué en prenant cette fois les valeurs de DA prédites par les spectres MIR Terrain (avec lissage+SNV) et les valeurs de teneur en carbone prédites avec les spectres bruts PIR Laboratoire. Ces valeurs ont servi à calculer de nouveaux *SCO Calculés*, toujours comparés aux *SCO Prédits* avec les spectres bruts MIR Laboratoire. Comme précédemment, les deux régressions ont été effectuées avec le même jeu de données (46 valeurs) afin de pouvoir les comparer correctement. Il a donc fallu tenir compte des outliers des modèles de prédiction de la DA, de la teneur en carbone et des SCO, c'est pourquoi il y a moins de données que dans le premier test.

Les *SCO Prédits* apparaissent à nouveau plus proches des *SCO Mesurés* que les *SCO Calculés*. En effet, le R^2 (0,9) de la régression figure 43 est supérieur à 0,8 celui de la régression figure 44.

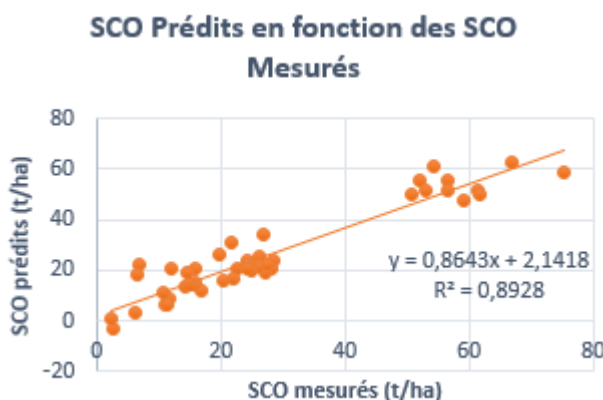


Figure 43 : SCO Prédits en fonction des SCO Mesurés

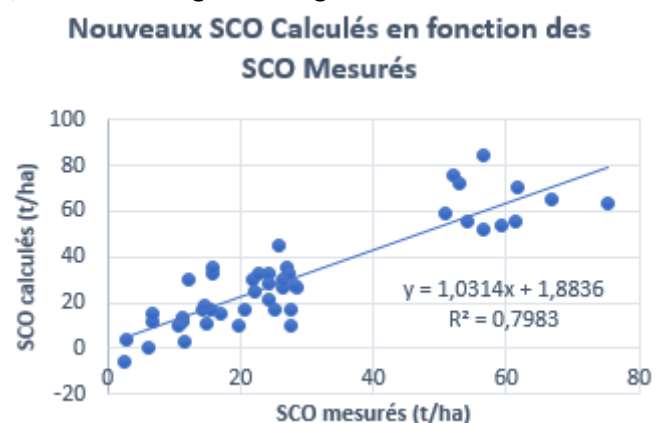


Figure 44 : Nouveaux SCO Calculés en fonction des SCO Mesurés

Les jeux de données entre les deux lots de régression n'étant pas les mêmes, il est difficile de les comparer. Il est cependant intéressant de remarquer que l'écart entre le R^2 de la régression de référence et celui de la nouvelle régression est toujours de 0,1. De même, les valeurs supérieures à 50t/ha Figure 44 paraissent s'éloigner fortement de la droite de régression.

Ainsi quelle que soit la méthode, il serait préférable de prédire directement les SCO. En effet, prédire les paramètres du calcul des stocks apporterait de la variabilité, en particulier pour les valeurs supérieures à 50t/ha. Cependant les régressions, qui ont amené à ces résultats, nécessiteraient d'être refaites avec un jeu de données plus conséquent.

CONCLUSION

De ces résultats, nous retiendrons qu'il est possible de prédire les stocks en carbone organique des sols de La Réunion grâce à des spectres moyen infrarouge et ce, de façon plus exacte qu'en proche infrarouge. Cependant si cela est vrai pour les SCO et la Densité Apparente, cela ne l'est pas concernant d'autres paramètres descriptifs des sols tels la teneur en carbone, mieux prédite en PIR Laboratoire, et la teneur en eau qui semble aussi bien prédite en MIR qu'en PIR.

Les modèles réalisés sur les spectres MIR DRIFT Laboratoire donnent les résultats les plus fiables avec un R^2 de 0,8 ; un RMSE de 6,7 et un RDP de 2,7. Ces paramètres sont corrects, mais le RMSE reste élevé, il serait donc nécessaire de refaire les prédictions en augmentant, par exemple, le nombre d'échantillons.

Les prédictions en MIR ATR sur le terrain sont faibles, avec un R^2 de 0,6 ; un RMSE de 10,6 et un RDP de 1,8. Cependant, peut-être serait-il possible d'améliorer ces paramètres en élaborant un protocole de mesure sur le terrain qui faciliterait l'acquisition des spectres, notamment en contrôlant l'humidité de la carotte.

Enfin, il semble préférable de prédire directement les stocks en carbone organique plutôt que de prédire les paramètres (teneur en carbone et Densité Apparente) servant au calcul des SCO.

Ces résultats, même s'ils nécessitent d'être améliorés, sont encourageants et laissent imaginer qu'il sera un jour possible de déterminer les SCO directement in situ. Cela représenterait un avantage considérable (gain de temps et diminution des frais) tant pour les chercheurs que pour les agriculteurs. Par ailleurs, ce nouvel outil permettrait de cartographier efficacement les « puits » et les « sources » de carbone organique dans les sols agricoles. L'utilisation d'une telle carte participerait à l'application du « 4 pour 100 » en favorisant le stockage du carbone atmosphérique dans les zones « puits » et ainsi lutter contre le changement climatique.

REFERENCES

- 4pour1000. (2017, 04 27). *4 POUR 1000 - Comprendre*. Récupéré sur 4 POUR 1000: <http://4p1000.org/comprendre>
- ALBRECHT A., B. M. (1992). Les stocks organiques des principaux sols cultivés de la Martinique (Petites Antilles). *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, 23-36.
- BANWART, S., Noellemeyer, E., & Milne, E. (2015). *Soil carbon - science, management and policy for multiple benefits*. Croydon: SCOPE.
- BARTHES B.G., B. D. (s.d.). *Intérêt de la spectrométrie infrarouge quantitative pour l'étude de la biologie du sol. IRD, UMR Eco&Sol, Montpellier*. Consulté le 07 25, 2017, sur <http://slideplayer.fr/slide/2387067/>
- BELLON-MAUREL V., M. A. (2009). Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils-Critical review and research perspectives. *Soil Biology & Biochemistry*, 1398-1410.
- BLAIR N. (2000). Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for Chromic Luvisol in Queensland. *Soil Tillage and Research*, 55, 183-191.
- BOULET J.C., R. J. (2016). *CheMOOCs - Principe et outils de la chimométrie pour tous*. Consulté le 2017, sur <https://www.fun-mooc.fr/courses/Agreenium/66002/session01/about>
- CAMBOU A., C. R. (2015). Prediction of soil carbon stock using visible and near reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field. *Geoderma, Elsevier*(261), 151-159.
- CNRS. (2016). *Le cycle du carbone*. Consulté le 07 11, 2017, sur http://www.cnrs.fr/cnrs-images/sciencesdelaterreaulycee/contenu/dyn_ext2-1.htm
- CORBEELS M., M. R. (2016). Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. *Scientific Reports*, 6, 8.
- GENOT V., D. P. (2014). L'intérêt de la spectroscopie proche infrarouge en analyse de terre (synthèse bibliographique). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 18(2), 247-261.
- GOGÉ F. (2014). *Préparation, Exploration de la base d'analyse des sols du laboratoire du CIRAD Saint Denis - Application CARBONE*. Saint Pierre: CIRAD, mémoire M1.
- HIDALGO C., E. J.-R.-M.-G. (2010). Mineralogical characterization of the fine fraction (<2 µm) of degraded volcanic soils and tepetates in Mexico. *Applied Clay Science*(49), 348-358.
- JACQUES G., S. B. (2008). *Les puits de carbone*. Lavoisier.
- JARECKI M.K., L. R. (2003). Crop Management for soil carbon sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 22, 471-502.
- JUSSIEU. (s.d.). *Le cycle du carbone*. Consulté le 07 12, 2017, sur <http://cycleducarbone.ipsl.jussieu.fr/index.php/visiteurs/des-faits-marquants/24-augmentation-plus-rapide-du-co2-dans-l-atmosphere>
- KING P.L., M. S. (2004). Infrared spectroscopy in Geochemistry, exploration geochemistry, and remote sensing. *Mineralogical Association of Canada*, 33.
- LE FOLL S. (2016, 12 04). UN Climate Conference, COP 22. (C. F. Safety, Intervieweur) Marrakech.

- Le télescope spatial HERSCHEL. (s.d.). *Détecter l'infrarouge*. Consulté le 07 24, 2017, sur http://www.herschel.fr/fr/dossiers/astronomie_infrarouge/detecter_l_infrarouge.php
- LEGROS J.P. (2007). *Les grands sols du monde*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- LULEVA M., V. H. (2017, 08 11). *Near-Infrared Spectroscopy for soil analysis*. Récupéré sur SoilCares: <http://www.soilcares.com/en/news/nir-soilanalysis/>
- MATHIEU C., L. J. (2011). *Dictionnaire encyclopédique de science du sol*. Paris: TEC & DOC.
- MCDOWELL M.L., B. G. (2012). Soil total carbon analysis in Hawaiian soils with visible, near-infrared and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 312-320.
- Ministère de l'Agriculture, d. l. (2014). *4pour1000 : comprendre*. Récupéré sur <http://4p1000.org/comprendre>
- MVAD. (2003). Chapitre 2 : Le sol, milieu vivant et complexe. Saint Denis: Chambre d'Agriculture Réunion.
- PIRIE A., S. B. (2003). Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopic Technique to Predict Several Soil Properties. *Vols*, 1-13.
- POUZET D. (2011). *Production durable de biomasse - La lignocellulose des poacées*. QUAE.
- RAMOS M. (2017). *Impacts des systèmes maraichers sur les stocks en carbone des sols réunionnais*. Saint Pierre, La Réunion: CIRAD.
- RAUNET, M. (1991). *Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion - conséquences pour la mise en valeur agricole*. CIRAD.
- RAZAFIMBELO-ANDRIAMIFIDY T., A. A. (2010). Stockage du carbone dans les sols sous systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV) dans différents contextes pédoclimatiques à Madagascar. *Etude et Gestion des sols*, 17, 143-58.
- REEVES J., M. C. (2002). The potential of diffuse reflectance spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils. *Environmental pollution*(116), 277-284.
- REEVES J.B. (2010). Near-versus mid infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus analysis : Where are we and what needs to be done ? *Geoderma*, 158, 3-14.
- ROBERTSON A.H.J., H. H. (2013). *Analysis of soil in the Field using portable FTIR*. Rome: Internatinal Workshop "Soil Spectroscopy : the present and future of soil Monitoring" FAO HQ.
- ROSIES B. (2016). *Pratiques agricoles et longévité des plantations de canne à sucre à La Réunion, quelles interactions avec les stocks de carbone des sols ?* Saint Pierre, La Réunion: CIRAD.
- RUMPEL C., J. L.-K. (2001). Quantification of carbon derived from lignite in soils using mid-infrared spectroscopy and partial least squares. *Organic Geochemistry*, 32, 831-839.
- SILA A.M., S. K. (2016). Evaluating the utility of mid-infrared specral subspaces for predicting soil properties. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 153, 92-105.
- SMITH P., F. C. (2010). A warm response by soils. *Nature*(464), 499-500.
- SPARKS, D. (2003). *Environmental Soil Chemistry* (éd. Second). New-York: Academic Press.

- STERNE M. (2016). *Evaluation par spectroscopie infra-rouge des stocks en carbone des sols agricoles réunionnais. Mesures in-situ et construction de modèles de prédictions*. Saint-Pierre: Rapport de M2.
- THE COBLENTZ SOCIETY. (s.d.). *William Weber Coblentz*. Consulté le 07 24, 2017, sur <http://www.coblentz.org/home/history/william-weber-coblentz>
- THENG E.B.K.G., R. M. (1980). SURFACE PROPERTIES OF ALLOPHANE, HALLOYSITE, AND IMOGOLIT. *Clays and Clay Minerals*, 28(4), 285-294.
- TRUCHE C. (2010). *Caractérisation et quantification des minéraux argileux dans les sols expansifs par spectroscopie infrarouge aux échelles du laboratoire et du terrain*. Toulouse: Thèse de Doctorat.
- UVED. (s.d.). *Les ondes électromagnétiques*. Consulté le 07 25, 2017, sur <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/1-2-les-ondes-electromagnetiques.html>
- VENKATPEN C. (2012). *Etude des déterminants géographiques et spatialisation des stocks de carbone des sols de la Martinique*. Antilles-Guyane: Thèse de Doctorat .
- VISCARRA ROSSEL R.A., W. D. (2006). Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131, 59-75.

ANNEXE 1 : DEROULEMENT DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL JOUR APRES JOUR

Jour J				J+1		J+2		
Terrain		Labo						
3 G O U G E S 1 M	1. SMIR ATR sur la carotte (5spectres /ech)	Aliquote Pf_al	Tamissage 2mm si EG	Lavage refus	Aliquote à l'étuve 105°C 48h			
	2. SPIR sur surface arrasée (5spectres /ech)	Séchage échantillon à l'étuve (25°C) pendant 24h	Tamissage 2mm si EG	Refus	Lavage refus	PEG_ech		
						SPIR		
						2 pots : labo et pédothèque C@RUN		
		Terre fine	Broyage 200µm		SMIR DRIFT			
9 C Y L I N D R E S	3.Prélèvement et pesée en frais de l'échantillon: Pf_ech	Surface Spécifique	Séchage à l'air libre 24h			Pesée surface spécifique : Pf_SS	Pesée : Ps_SS	
		Aliquote Pf_alc	Tamissage 2mm si EG	Lavage refus	PEG_alc			
			Aliquote à l'étuve 105°C 48h			Pesée aliquote: Ps_alc		
		Reste	Lavage eau	PEG_restec				

P_{f_ech} : Poids frais échantillon

P_{s_tf_ech} : Poids sec de terre fine de l'échantillon

P_{s_tf_pesé} : Poids sec terre fine de l'échantillon sans aliquote

P_{EG} : Poids éléments grossiers

P_{fai} : Poids frais aliquote

P_{sal} : Poids sec aliquote

P_{f_echc} : Poids frais cylindre

P_{s_tf_echc} : Poids sec de terre fine de l'échantillon cylindre

P_{s_tfc_pesé} : Poids sec de terre fine de l'échantillon cylindre sans aliquote

P_{EGc} : Poids éléments grossiers cylindre

P_{falc} : Poids frais aliquote cylindre

P_{salc} : Poids sec aliquote cylindre

D_g : Diamètre de la gouge (8,4 cm)

D_c : Diamètre du cylindre (8,8 cm)

H_{ech} : Hauteur de l'échantillon (10 cm)

V_{ech_g} : Volume de l'échantillon gouge

V_{ech_c} : Volume de l'échantillon cylindre

P_{eau_ech} : Poids de l'eau dans l'échantillon

T_{h_ech} : Taux d'humidité de l'échantillon

P_{s_tf_ech} : Poids sec de terre fine de l'échantillon

P_{eau_al} : Poids de l'eau dans l'aliquote

T_{h_al} : Taux d'humidité de l'aliquote

C : teneur en carbone (mg.g⁻¹)

DA : densité apparente (g.cm⁻³)

E : Epaisseur de l'horizon (cm)

SOC : Soil Organic Carbon (kg.m⁻²)

$$P_{\text{eau_ech}} = P_{\text{f_ech}} - P_{\text{s_tf}} - P_{\text{EG}}$$

$$T_{\text{h_ech}} = P_{\text{eau_ech}} / (P_{\text{f_ech}} - P_{\text{EG}})$$

$$P_{\text{s_tf_ech}} = P_{\text{s_tf_pesé}} + P_{\text{s_al}}$$

$$P_{\text{eau_al}} = P_{\text{f_al}} - P_{\text{s_al}}$$

$$T_{\text{h_al}} = P_{\text{eau_al}} / P_{\text{f_al}}$$

$$T_{\text{h_al}} = T_{\text{h_ech}}$$

$$T_{\text{h_al}} = P_{\text{eau_ech}} / (P_{\text{f_ech}} - P_{\text{EG}})$$

$$P_{\text{eau_ech}} = T_{\text{h_al}} * (P_{\text{f_ech}} - P_{\text{EG}})$$

$$P_{\text{s_tf}} = P_{\text{f_ech}} - P_{\text{EG}} - P_{\text{eau_ech}}$$

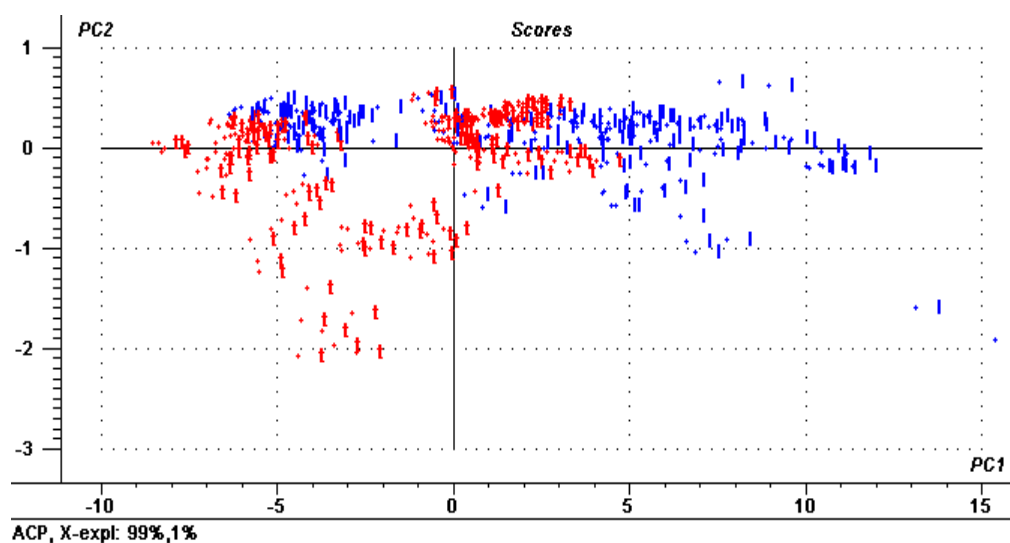
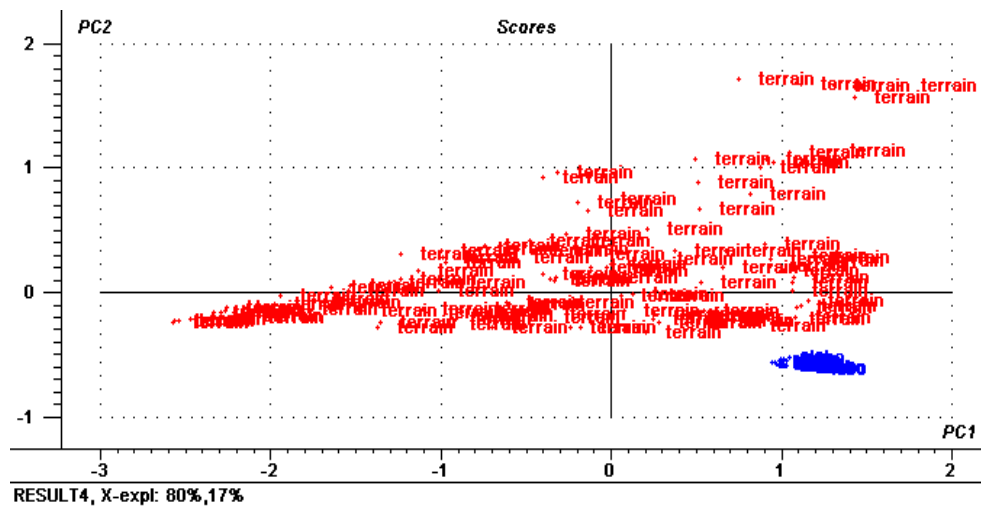
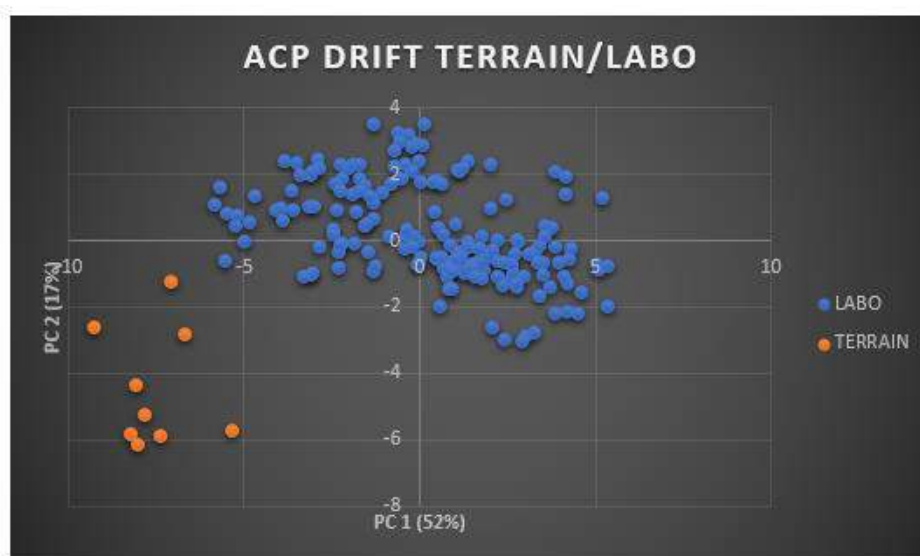
$$V_{\text{ech_g}} = \pi * (D_{\text{g}} / 2)^2 * H_{\text{ech}} = \pi * (8,4 / 2)^2 * 10 = 554.2 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{ech_c}} = \pi * (D_{\text{c}} / 2)^2 * H_{\text{ech}} = \pi * (8,8 / 2)^2 * 10 = 608.2 \text{ cm}^3$$

$$DA_{\text{ech}} = (P_{\text{s_tf}} + P_{\text{EG}}) / V_{\text{ech}}$$

$$SOC = C * (1 - \text{éléments grossiers}) * DA * E$$

ANNEXE 3 : ACP TERRAIN/LABO MIR ET PIR



RESUME

Chaque années 4,3 milliards de tonnes de carbone sont rejetées dans l'atmosphère, intensifiant le réchauffement climatique. Le programme « 4pour1000 » a annoncé qu'il serait possible de contrer cette augmentation en stockant annuellement 0,4% de carbone en plus dans les sols agricoles et forestiers. C'est dans ce contexte que le projet C@RUN est né. Un de ses objectifs est de mettre en place une méthode in situ rapide et efficace de mesure des Stocks en Carbone Organique (SCO) des sols. A l'aide d'un carottier et de deux spectromètres de terrain (proche et moyen infrarouge, soient MIR et PIR), 300 spectres ont été acquis sur les cinq grands types de sols réunionnais. Autant de spectres ont été réalisés en laboratoire, sur les mêmes sols et avec les mêmes appareils. Afin d'avoir une référence, les SCO, ainsi que la densité apparente, la teneur en eau et la teneur en carbone, ont été déterminés à l'aide d'analyses conventionnelles. Les modèles de prédictions des SCO ont été élaborés grâce au logiciel The Unscrambler. Il en ressort que si la méthode MIR DRIFT Laboratoire permet de prédire efficacement les SCO et ce, de façon plus juste qu'en PIR, les prédictions de la méthode MIR ATR Terrain restent encore à améliorer. Par ailleurs, il semblerait plus fiable de prédire directement les SCO plutôt que de prédire les paramètres servant à leur calcul. Ainsi ces résultats, bien qu'ayant besoin d'être perfectionnés, sont encourageants et laissent imaginer qu'il sera un jour possible de déterminer les SCO directement dans les champs.

ABSTRACT

Every year 4,3 billion tons of carbon are rejected into the atmosphere, increasing global warming. The "4pour1000" program has announced that it would be possible to combat this increase, by storing annually a further 0,4% of carbon in agricultural and forest soils. It is in this context that the C@RUN project was born. One of its objectives is to set up a method in situ to measure fast and efficiently the Organic Carbon Stock (OCS). By means of a corer and of two portable spectrometers (near and mid infrared, called MIR and NIR), 300 spectra were acquired from the five most important soil types from La Réunion. The same number of spectra were realized at the laboratory, on the same soils and with the same measuring instruments. To have references, the OCS, as well as the bulk soil density, the water content and the carbon, were determined by conventional analyses in the laboratory. The prediction models of the OCS were developed thanks to the software The Unscrambler. This brings to light that, if the method MIR DRIFT laboratory enables to predict efficiently the OCS and more precisely than the NIR, the predictions of the MIR ATR method in the fields still has room for improvement. Besides, it would seem more reliable to predict directly the OCS than to predict the parameters used to calculate them. Thus, these results, although needing to be improved, are encouraging and suggest that one day, it will be possible to determine the OCS directly in the fields.